



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra pedagogiky a psychologie

Bakalářská práce

Neurální koreláty reprezentace číselných řad

Vypracovala: Petra Janíčková
Vedoucí práce: Mgr. Michal Vavrečka, Ph.D.

České Budějovice 2016

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval/a samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

Datum

Podpis

Na tomto místě bych chtěla poděkovat panu Mgr. Michalu Vavrečkovi, Ph.D. za možnost proniknout do zajímavého tématu, za trpělivé vedení a laskavou pomoc v průběhu práce. Dále děkuji panu Bc. Michaelu Tesaři za pomoc s technickou stránkou celého projektu a řešení neočekávaných technických potíží. Děkuji rovněž Mgr. Tomáši Mrhálkovi a Mgr. Michale Plassové za cenné podněty, rady a nápady. V neposlední řadě bych ráda poděkovala panu Jiřímu Bezemkovi, Bc. Jiřímu Nádvorníkovi a Bc. Michaelu Pokornému za jejich podporu

Abstrakt bakalářské práce

Název práce: Neurální koreláty reprezentace číselných řad

Autor práce: Petra Janíčková

Vedoucí práce: Mgr. Michal Vavrečka, Ph.D.

Počet stran: 72

Počet příloh: 3

Počet titulů použité literatury: 107

Cílem teoretické části práce je základní uchopení mentálního konceptu čísla a jeho reprezentace v prostoru se zvláštním zaměřením na mentální číselné osy.

Výzkumná část práce je zaměřena na ověření změny gama aktivity v parietálním lobe při úlohách spojených s výpočetními operacemi na číselných řadách v kanonické (zleva doprava) a nekanonické (zprava doleva) podobě. Probandům jsou prezentovány úlohy zaměřené na mentální reprezentaci číselné osy. Následně provádějí aritmetické operace a zaujmají perspektivu (perspective taking).

Měřením EEG aktivity během prezentace a řešení daných úloh zachycujeme změny aktivity v parietální oblasti mozku. Tento experiment navazuje na předchozí výzkum, který poukazuje na odlišnosti v činnosti parietální oblasti při podobných operacích. Oproti předchozímu výzkumu došlo k modifikaci prezentace stimulů - eliminaci prostorové informace, která mohla ovlivnit způsob práce s úlohami (volbu strategií) v předchozí studii.

Klíčová slova: neurální koreláty, číselné řady, číslo, prostor, reprezentace, elektroencefalografie, EEG.

Abstract of Thesis

Title: Neural correlates of number line representation

Author: Petra Janíčková

Supervisor: Mgr. Michal Vavrečka, Ph.D.

Number of pages: 72

Number of appendices: 3

Number of references: 107

Goal of the theoretical part of this thesis is a basic grasp of the mental concept of number and its representation in space with special focus on mental number lines.

The research part of this thesis is focused on verification of changes of the gamma activity in the parietal lobe during tasks connected with calculating operations on the number lines in canonical (left to right) and non-canonical (right to left) scheme. Test subjects were presented with tasks focused on the mental representation of the number line. Then they were asked to do arithmetic operations and perspective taking.

By measuring the EEG activity during presentation and solving given tasks we are capturing changes of the activity in the parietal area of the brain. This experiment relates to previous research, which is pointing out the differences in activity in the parietal area during similar operations. In comparison with previous research there has been a modification in presentation of the stimuli – elimination of the space information, which could have influenced the way of handling the task (choice of the strategy) in previous study.

Key words: neural correlates, number lines, number, space, representation, electroencephalography, EEG.

Obsah

Abstrakt bakalářské práce	iv
Abstract of Thesis	v
Obsah	vi
1 Úvod	5
Teoretická část	7
2 Princip analogického kódování proměnných v doménách času, prostoru a čísla	8
2.1 Mentální magnituda	10
3 Mentální reprezentace a neurální koreláty čísla	13
3.1 Mentální reprezentace	14
3.2 Neurální koreláty	14
3.3 Aproximativní numerický systém	15
3.4 Mentální reprezentace čísla	18
3.4.1 Abstraktní vs neabstraktní reprezentace čísla	18
3.4.2 Některé teoretické modely reprezentace čísla	19
3.4.3 Experimentální doklady abstraktní reprezentace čísla .	20
3.4.4 Kritika abstraktní reprezentace čísla	22

3.4.5	Experimentální data dokládající existenci neabstraktní reprezentace	23
3.5	Neurální koreláty čísla	25
3.5.1	Numerické neurony	25
4	Reprezentace čísla v prostoru	27
4.1	Mentální číselné osy	27
4.2	SNARC efekt	28
4.2.1	Replikace SNARC efektu s různými formami zápisu vstupní informace a v odlišných dimenzích	28
4.2.2	Původ levostranné orientace číselné osy – výchozí nastavení či vliv kultury?	31
4.2.3	SNARC efekt jako doklad existence mentálních os?	32
4.3	Neurofyziologické studie	32
5	Elektroencefalografie (EEG)	34
5.1	Systém kladení elektrod	34
5.2	Referenční elektrody	36
5.3	Měřicí elektrody	37
5.4	EEG signál	38
5.4.1	Některé základní rytmy mozkové aktivity	38
5.4.2	Artefakty	40
	Výzkumná část	42
6	Úvod do výzkumné části	43
7	Cíle výzkumu, výzkumné otázky a hypotézy	44
7.1	Cíle výzkumu	44
7.2	Výzkumný problém a výzkumné otázky	44
7.3	Výzkumné otázky	45

7.4	Hypotézy	46
7.4.1	Hypotézy vztahující se k behaviorálním datům	46
7.4.2	Hypotézy vztahující se k EEG datům	46
8	Experimentální design a etické aspekty	47
8.1	Výzkumná strategie	47
8.2	Výzkumný soubor	47
8.3	Měřicí technika	48
8.4	Příprava experimentu	48
8.5	Průběh experimentu	49
8.6	Úlohy a stimuly	50
8.6.1	Stimuly	50
8.6.2	Typy úloh a podmínky	50
8.7	Etické aspekty	51
9	Zpracování a analýza dat	52
9.1	Zpracování behaviorálních dat	52
9.2	Zpracování EEG záznamů	53
9.2.1	Změna formátu	53
9.2.2	Downsampling	53
9.2.3	Filtrování	53
9.2.4	Re-referencování	53
9.2.5	Extrakce kanálů	54
9.2.6	Extrakce artefaktů	54
9.2.7	Rekonstrukce událostí v EEG záznamu	54
9.2.8	Extrakce dat na základě událostí	55
10	Analýza dat a interpretace výsledků	56
10.1	Statistická analýza behaviorálních dat	56
10.2	Statistická analýza EEG dat	57
10.3	Výsledky	58

10.3.1 Beta	58
10.3.2 Gama	58
11 Diskuze	61
12 Závěr	63
Literatura	64
Appendix	76
Seznam příloh	76
Seznam obrázků	77

Kapitola 1

Úvod

Jedním z aktuálních témat kognitivní psychologie a kognitivní neurovědy je zájem o způsob, jakým lidský mozek pracuje se základními abstraktními koncepty času, čísla a prostoru. Zajímá nás především původ těchto bazálních konceptů (jak vznikají a jak probíhá jejich fylogeneze a ontogeneze), jejich neurální koreláty (které neurální obvody a oblasti jsou zapojeny), jejich nezávislost na zkušenosti či ovlivnitelnost tréninkem, edukací a kulturou. Tato práce se pokouší o základní teoretické uchopení mentálního konceptu čísla a jeho mentální reprezentace, jejímž jedním příkladem jsou mentální číselné osy.

Co mohou mít tyto odlišné abstraktní pojmy - čas, prostor a číslo společného? Jedná se o základní koncepty, jejichž prostřednictvím zakoušíme a strukturujeme vnější svět, a které předurčují a strukturují naši senzorickou zkušenost a naši kognici. Jsou pro nás natolik primární, že si jen stěží dokážeme představit, jak by mohl některý živočišný druh přežít bez schopnosti navigace v prostoru (mapování prostředí a plánování cesty) či zaujímání perspektivy (sledování predátora z úkrytu), orientace v čase (časově zbarvené vzpomínky) a alespoň elementárního zpracování numerické informace (např. odhadování potravní výnosnosti prostředí a výběr oblasti s nejvyšším předpokládaným výnosem). Během evolučního vývoje si

mnozí živočichové internalizovali základní zásady odpovídající fyzikálním a aritmetickým zákonitostem, které řídí interakce mezi objekty ve vnějším světě a získali schopnost provádět s nimi mentální operace. Schopnost reprezentace prostoru a čísla je součástí naší základní výbavy, kterou nepochybně sdílíme s ostatními živočichy.

Kognitivní neurovědci a neuropsychologové se tradičně zabývají „velkými“ tématy (typicky problematika vědomí), avšak přestože se nám mentální reprezentace čísla jeví jako velmi elementární fenomén, jedná se z kognitivního a psychologického hlediska o komplexní koncepty. Studie neurálních korelátů naznačují, že jak číslo, tak prostor (a také čas) sdílí blízké neurální obvody a regiony (především oblast intraparietálního sulcu a některé oblasti prefrontální kůry). Rovněž behaviorální data naznačují propojení všech tří konceptů a jejich vzájemnou interakci. Jedním z příkladů interakce domén čísla a prostoru je tendence mentálně reprezentovat čísla na prostorově orientované mentální číselné ose (tzv. hypotéza číselné osy).


Výzkumný projekt k této práci je založen na počítačovém zpracování a statistické analýze behaviorálních a EEG dat získaných během řešení početních a navigačních úloh na číselných osách. Experiment byl realizován v Neuropsychologické laboratoři Pedagogické fakulty Jihočeské Univerzity v Českých Budějovicích.

Teoretická část

Princip analogického kódování proměnných v doménách času, prostoru a čísla

Lidské kognitivní mechanismy byly formovány evolučně a musí tedy sdílet univerzální principy mentální architektury. Jedním z těchto univerzálních aspektů je princip analogického kódování. Předpokládáme, že alespoň některé aspekty naší kognice sdílí analogické způsoby kódování informace [Dehaene and Brannon, 2011]. Náš mozek v každý přítomný okamžik registruje a zpracovává nezměrné množství informací, s nimiž dále provádí operace různého typu a odlišné složitosti. Modulární model neurální architektury, kdy jednotlivé neurální moduly nezávisle na sobě navzájem registrují a zpracovávají odlišný specificky kódovaný typ informace, tedy nesdílí vstupy a zároveň nepracují ani s výstupy jiných modulů, nemusí být u kognitivně náročnějších operací funkčně nejefektivnější. Lidské kognitivní schopnosti se postupně evolučně přizpůsobovaly měnícím se selekčním tlakům. Je tudíž pravděpodobné, že se některé schopnosti rozvinuly na neurálním podkladu sloužícím původně k jinému účelu (exaptace) a sdílí společný neurální substrát a způsob kódování informace.


Příkladem může být schopnost mentální rotace dvojrozměrných a trojrozměrných objektů a její analogie se skutečnou rotací fyzických objektů v externím světě. Dnes již klasický výzkum mentální rotace objektů R. Sheparda and J. Metzler odhalil fenomén lineárního vztahu reakčního času a úhlu mentální rotace objektu [Cooper, 1975]. Subjektům byly prezentovány dva obrázky trojrozměrných objektů natočených z odlišného úhlu. Úkolem probanda bylo rozhodnout, zda se jedná o identické objekty. Délka reakčního času rozhodnutí rostla lineárně s narůstajícím úhlem rotace. Řešení úlohy trvalo tím déle, čím vyšší stupeň rotace musel být s útvarem proveden. Můžeme tedy předpokládat analogii operace mentální rotace s reálnou rotací objektu, kdy objekt otáčíme postupně po krocích, dokud nedosáhneme požadovaného úhlu pohledu, tedy se stupněm rotace objektu roste čas potřebný k provedení úkonu.

Dalším příkladem analogického kódování může být Moyerův a Landauerův výzkum efektu vzdálenosti (distance effect) a velikosti (size effect). Při porovnávání dvou čísel je reakční čas závislý na numerické vzdálenosti těchto dvou hodnot (distance effect) nebo na rozdílu v jejich velikosti (size effect). Tedy čísla 2 a 9 detekujeme jakožto odlišná v kratším reakčním čase než čísla 2 a 3 [Moyer and Landauer, 1967]. Tento efekt se projeví bez ohledu na modalitu vstupu (auditivní, vizuální) a na typ symbolického formátu vstupní informace (arabská číslice 2, římská číslice II, , dva údery). Mechanismus porovnávání dvou číselných hodnot je analogický při porovnávání jiných proměnných – např. porovnávání délky úseček, porovnávání vzdáleností. Možným vysvětlením těchto analogií napříč modalitami a typy vstupní informace může být existence obecnějšího principu, který všechny tyto vstupy sdílí – mentální magnitudy.

2.1 Mentální magnituda

Pojmem mentální magnituda („mental magnitude“) rozumí C. R. Gallistel neurální realizaci čísla, se kterým lze provádět aritmetické operace. Mentální magnituda je přirozené číslo charakterizující množství (kvantitu) a můžeme s ním provádět matematické operace, jakými jsou např. sčítání, odčítání, násobení a dělení. Odkazuje na spojitě nebo diskrétní proměnné, se kterými má živočich zkušenost a se kterými operuje. Mentální magnitudou rozumíme numerickou hodnotu čísla.

Mentální magnituda je užívaná při reprezentaci prostoru, času a čísla. Magnitudy v různých doménách (odlišných veličin) jsou vzájemně propojeny (např. hustota = počet objektů děleno prostorem, který zaujímají) a jsme s nimi schopni provádět analogické aritmetické operace [Brannon et al., 2001]. Pojem „magnituda“ užívá Gallistel namísto pojmu „číslo“, jelikož „číslo“ odkazuje kromě počtu na další komponenty – aritmetické symboly (1, I.), lingvistické pojmenování („jedna“, „jednička“), abstraktní ideu čísla (viz obr.1), kdežto magnitudou rozumí pouze počet (numerosity, count).

	= počet (reálný počet něčeho, kvantita, numerosita, odpověď na otázku "Kolik?") - count, numerosity	
ČÍSLO	= číslo (abstraktní idea čísla) - number	číslo 3
(ang. NUMBER)	= číslice (znak, symbol, grafém) - figure	trojka, 3
	= číslovka (lingvistické označení počtu nebo čísla, slovní pojmenování) - numeral	"tři", "trojka"

Obrázek 2.1: Schéma významů pojmu číslo (autor Petra Janíčková, inspirováno literaturou a přednáškami doc. Ing. Ivana Havla, CSc., Ph.D.)

V matematice je pojem magnituda užíván pro velikost matematického objektu. Velikost je zde chápána jako vlastnost, dle které může být objekt porovnán s jinými objekty stejné třídy jako menší či větší. Magnitudu

číslo jinak nazýváme absolutní hodnota čísla - jeho vzdálenost od nuly na číselné ose.

Schopnost reprezentovat číslo jako mentální magnitudu a operovat s magnitudami mají také mnohá zvířata a objevuje se relativně brzy v rámci ontogeneze. Experimenty se zvířecími probandy dokládají schopnost reprezentace mentální magnitudy a provádění operací analogických s aritmetickými u některých druhů zvířat. J. Gibbon a R. Church [Gibbon and Church, 1981] testovali subjektivní vnímání času u holubů a laboratorních potkanů. Zvířata si mohla vybrat mezi dvěma podmínkami přidělování odměny. V prvním případě byla zvířata odměněna ve fixním časovém intervalu (např. 30 s.). Druhá možnost znamenala dávkování potravy v postupně se zkracujících intervalech, avšak počáteční interval byl delší než u varianty s fixním intervalem (např. 40 s.). Druhá volba byla tedy z krátkodobého hlediska méně výhodná, avšak v dlouhodobém horizontu výnosnější, jelikož po nějaké době byl interval dávkování kratší než u fixní varianty (např. 10 s.). Oba zvířecí druhy se rozhodly přejít z fixního dávkování na zkracující se interval v okamžiku, kdy pro ně fixní interval již nebyl výhodný (interval druhé varianty byl kratší než fixní). Zvířata užila v tomto experimentu schopnost mentálního odečítání v časové doméně [Dehaene and Brannon, 2011]

S. Lourenco a M. Longo testovali interakce napříč dimenzemi času, prostoru a čísla u devítiměsíčních dětí a dokládají přenos asociačního učení napříč různými doménami. V jednom z experimentů se děti naučí spojovat velikost objektů s určitým vzorem (velké objekty jsou zobrazeny s černobílými proužky, kdežto malé objekty jsou bílé s tečkami). Děti očekávaly analogický systém mapování pro počet (malý počet = černobílé proužky, velký počet = bílá s tečkami) a pro délku zobrazení objektů (krátký interval = černobílé proužky, dlouhý interval = bílá s tečkami). Přenos mezi doménami byl oboustranně přítomen u všech kombinací velikosti,

počtu a délky časového intervalu [Lourenco and Longo, 2010]. Autoři tímto empiricky podporují předpoklad existence prelingvistického systému pro univerzální mentální magnitudu, jenž je v rámci ontogeneze jedince relativně brzy přítomen. Reprezentace informací o magnitudě mohou tedy být alespoň zčásti abstraktní (převedeny ze specifických kódů na univerzální systém kódování).

Sdílí tedy mentální reprezentace času, prostoru a čísla společné neurální koreláty, nebo se jedná o anatomicky oddělené avšak interagující systémy? Existuje univerzální „cit pro magnitudu“ (sense of magnitude) nebo je jedna dimenze (např. prostor) užívaná jako referenční rámec pro všechny ostatní proměnné ([Lourenco and Longo, 2010], [Srinivasan and Carey, 2010] [De Hevia and Spelke, 2010])? Mnohá behaviorální data demonstrují reciprokou interakci napříč dimenzemi času, prostoru a čísla (např. mentální rotace objektů, efekt vzdálenosti, SNARC efekt). Studie užívající neurovizuální techniky k lokalizaci neurálních korelátů mentálních funkcí poukazují na existenci sdílených neurálních mechanismů pro tyto tři domény v oblasti posteriorního parietálního kortexu. Tyto poznatky podporují možnou existenci univerzálního sdíleného mechanismus pro magnitudu bez ohledu na to, kterých veličin se tato hodnota týká - zda počítáme s čísly, navigujeme se v prostoru, nebo operujeme s časovými údaji.

Mentální reprezentace a neurální koreláty čísla

Čísla jsou nepochybně neodmyslitelnou součástí našeho každodenního života. Umožňují nám kvantifikovat, kategorizovat, porovnávat, identifikovat a dalšími způsoby uchopovat zkušenost s vnějším světem. Jsme schopni nejen konkrétního označení kvantity (1, 5, 1000...), ale také abstraktnějších numerických úsudků (méně-více, mnoho-málo, menší-větší...). Lidská schopnost verbalizovat koncept čísla umožnila rozvoj matematiky, logiky a technologický pokrok, avšak můžeme předpokládat, že se vyvinula na biologických základech primárnějších kognitivních kompetencí, které sdílíme s jinými živočišnými druhy. Schopnost reprezentace numerické informace a provádění operací s čísly byla podrobena detailnímu průzkumu u dospělého člověka, dětí a mnohých zvířecích druhů. „Počítání“ či neurální koreláty operací s čísly byly popsány mimo jiné u našich fylogeneticky nejbližších příbuzných – primátů ([Nieder, 2005]; [Nieder and Miller, 2003]; [Miller et al., 2003]; [Nieder and Merten, 2007]; u některých ptáků ([Koehler, 1941]; [Thompson, 1968]; [Brannon et al., 2001]; [Ujfalussy et al., 2014]), hlodavců ([Davis and Bradord, 1986]; [?]) a rovněž u bezobratlých ([Dacke and Srinivasan, 2008]). Z četných etologických a srovnávacích studií zachycujících

numerické kognitivní schopnosti zvířat vyplývá nezávislost bazální numerické kompetence na lidském jazyce. Zvířata jsou schopna numerických operací na neverbální úrovni. Někteří autoři proto předpokládají existenci analogického systému pro numerickou magnitudu (ANS), založeném na odhadu a na jazyce nezávislém způsobu kódování ([Cantlon and Brannon, 2006]; [Dehaene and Brannon, 2011]). Tento systém byl experimentálně studován u zvířat a dětí, které ještě nemají zkušenost s výukou matematiky ([Halberda and Feigenson, 2008]; [Libertus et al., 2011]).

3.1 Mentální reprezentace

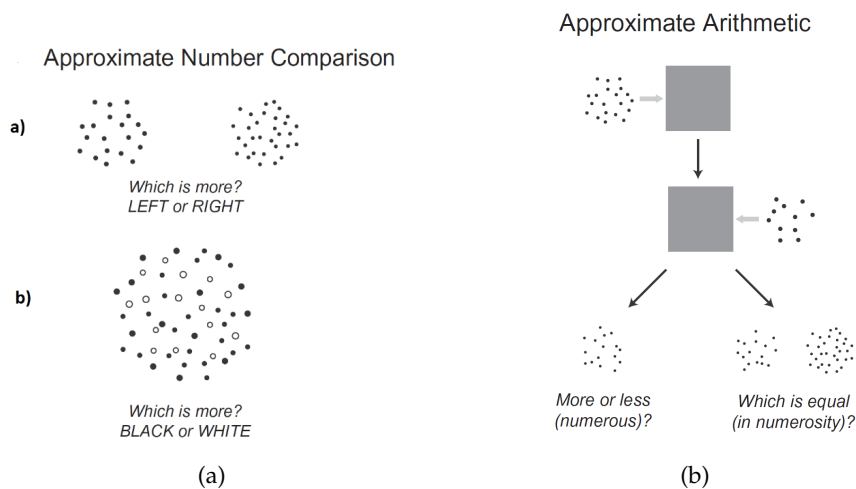
Pojem mentální reprezentace je v psychologii a kognitivní vědě hojně užíván, avšak může být definován na několika úrovních. V této práci bude pojem mentální reprezentace užíván ve smyslu vzorce neurální aktivace, která odpovídá aspektům externího prostředí [Johnson and Munakata, 2005]. Reprezentace čísla pak souvisí s aktivací, která je modulována numerickou magnitudou vyjádřenou číslem. Je nutné, rozlišit reprezentaci a zpracování informace (processing), které zahrnuje další komponenty jako např. výběr odpovědi, užití pracovní paměti aj. [Kadosh and Walsh, 2009]

3.2 Neurální koreláty

Neurálním korelátem je neurální aktivita, která je nezbytná k produkci určité mentální aktivity a je tedy jejím neurálním odrazem. Například neurálními koreláty sčítání dvou jednociferných přirozených čísel je mozková aktivita, ke které při této operaci dochází a která nám umožňuje sečíst dvě čísla. Nezajímá nás přitom pouhá lokalizace aktivity (např. intraparietální sulcus), ale také její průběh, neurální obvody, které jsou zapojeny (a v jakém pořadí). Smyslem je jednak lokalizace aktivity a také vytvoření jakéhosi schématu průběhu této akce („Co se v mozku děje, když...“).

3.3 Aproximativní numerický systém

Aproximativní numerický systém (ANS, approximate number system) je hypotetický evolučně, kulturně a vývojově univerzální systém reprezentující čísla jako mentální magnitudy. Prostřednictvím ANS odhadují lidé a jiné živočišné druhy kvantitu a manipulují s magnitudami bez potřeby užití numerických symbolů a znalostí matematiky. Děti či zvířata dokážou např. pouhým pohledem porovnat dva shluky objektů a určit, ve které skupině je objektů více či méně, aniž by jednotlivé objekty počítali (approximate number comparison task). Stimuly mohou být prezentovány simultánně (obě skupiny objektů jsou zobrazeny zároveň vedle sebe) či sériově (první skupina → prodleva → druhá skupina). Sety mohou být zobrazeny samostatně jako celky nebo sloučené do jedné skupiny a odlišeny barvou.

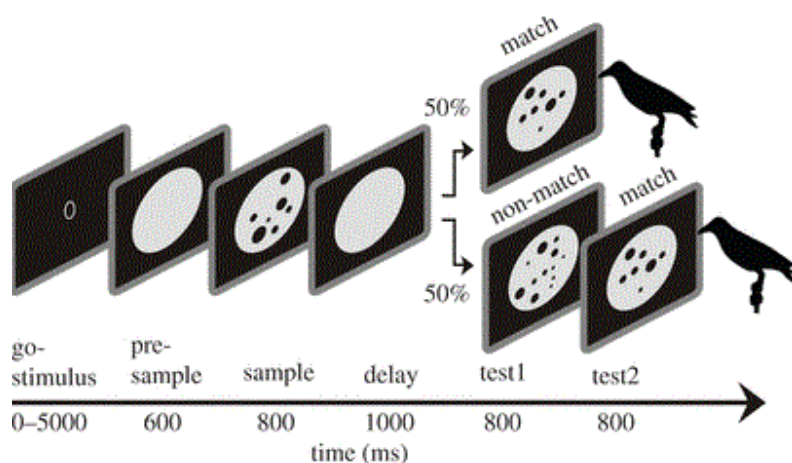


Obrázek 3.1: Ilustrace úlohy aproximativního numerického srovnávání a aproximativní aritmetiky (zdroj: převzato z Park Brannon, 2014)

U zvířecích subjektů je analogií úlohy numerického porovnání tzv. *matching to sample numerosity task*. Zvířeti je nejprve prezentován modelový podnět (např. magnituda 7) a posléze společně dva výběrové podněty,

3.3. Aproximativní numerický systém

jeden shodným počtem s modelovým a jeden neodpovídající modelovému. Úkolem zvířete je vybrat výběrový podnět, který svou magnitudou odpovídá modelovému podnětu.



Obrázek 3.2: Matching to sample numerosity task (zdroj: Ditz Nieder, 2016)

V úlohách aproximativního porovnávání počtu je důležité eliminovat všechny možné další klíče, kterými by se subjekt (člověk či zvíře) mohl řídit. Ideálním případem prezentace stimulu je situace, kdy je ošetřena velikost objektů, jejich rozmístění, plocha, kterou objekty zabírají, zbývající volná plocha, tvar a barva.

„Doklady o univerzalitě ANS pocházejí ze čtyř výzkumných oblastí: kognitivní vývoj ([Gallistel and Gelman, 2000]; [Feigenson et al., 2004]), srovnávací kognice ([Hauser and Spelke, 2004]; [Cantlon and Brannon, 2005]; [Cantlon and Brannon, 2007]), mezikulturní kognice [Pica et al., 2004] a neurobiologie ([Butterworth, 1999]; [Dehaene et al., 2003]; [Dehaene et al., 2004])“ [Cantlon et al., 2009]. V rámci kognitivního vývoje jsou testovány schopnosti dospělých [Park and Brannon, 2014] a dětí různého věku a stupně vývoje ([Gallistel and Gelman, 2000]; [Halberda and Feigenson, 2008]; [Libertus et al., 2011]). Srovnávací kognice se zabývá kognitivními schopnostmi zvířat. Pica et al. studovali vztah mezi jazykem a aritmetikou u

rodilých mluvčích amazonského jazyka Mundurukú. Přestože tento jazyk postrádá lexikální označení pro počet vyšší než 5, jsou tyto lidé schopni porovnávat a počítat daleko vyšší čísla ([Pica et al., 2004]). Neurobiologicky orientované studie usilují o nalezení neurálních korelátů ANS a předpokládají jeho lokalizaci v parietálním lobu.

V doméně čísel je ANS považován za nutný předpoklad pozdějších aritmetických schopností. Děti, lidé z Amazonských kmenů postrádající verbální numerický systém a zvířata odhadují prostřednictvím ANS množství nebo změny v množství (méně-více). J. Park a E. M. Brannon se zabývali vlivem nácviku neverbálních numerických kompetencí na výkon v testech aritmetiky. Podrobili univerzitní studenty náhodně přiřazené k jedné ze čtyř skupin pre-testu aritmetiky, po němž následoval systematický nácvik sestávající z úloh na aproximativní srovnávání (approximate number comparison), aproximativní aritmetiku (approximate arithmetic), vizuoprostorovou krátkodobou paměť nebo seřazování číslovek (numerical symbol ordering). V závěrečném post-testu aritmetických schopností došlo k signifikantnímu zlepšení u skupiny trénující aproximativní aritmetiku. ([Park and Brannon, 2014]). Následující studie by měly testovat podobné zlepšení u předškolních dětí. Předpokládá se, že nácvik podobných úloh zvyšuje neurální konektivitu parietálního lobu a připraví tak předškolní děti lépe na školní výuku matematiky.

Zůstává otázkou, zda by se mělo jednat o systém specializovaný pro doménu čísel, nebo zda jsou kognitivní a neurální mechanismy zprostředkovávající ANS sdílené pro magnitudy jiných domén (např. čas, prostor aj.). Jessica F. Cantlon, Michael L. Platt, a Elizabeth M. Brannon [Cantlon et al., 2009] docházejí k závěru, že je systém ANS sdílený pro úsudky týkající se kvantit napříč doménami. Je tedy ANS neurálním korelátem pro univerzální mentální magnitudu? ANS indikuje existenci univerzálního analogického mentálního kódu pro reprezentaci čísel.

3.4 Mentální reprezentace čísla

Pokud se budeme zabývat samotnou reprezentací čísla, narazíme na dvě výzkumné linie obhajující dva odlišné způsoby, jakými mohou být čísla neurálně reprezentována – hypotézu abstraktní a neabstraktní reprezentace čísla. Roi Cohen Kadosh a Vincent Walsh [Kadosh and Walsh, 2009] o tomto tématu podrobně pojednávají a napadají doposud převládající hypotézu abstraktní reprezentace čísla. Shrnují výsledky dosavadních studií a upozorňují na jejich metodologické a teoretické nedostatky. V sérii experimentů demonstrují existenci neabstraktní reprezentace napříč různými typy úloh. Autoři navrhuje zahrnout do testování úlohy založené na automatickém zpracování čísla a eliminovat tak vlivy podmínek úkolu a vliv užití odlišných strategií řešení. V závěru navrhuje nový model duálního kódování reprezentace čísla inspirovaný hypotézou dvojího kódování ([Paivio and Csapo, 1973] – dual code hypothesis).

Numerická informace může mít různý vstupní formát a přesto stále reprezentovat stejnou kvantitu (magnitudu). Číslo může být vyjádřeno symbolicky např. arabskou číslicí (2), římskou číslicí (II), slovně číslovkou v českém jazyce (dvě) či nesymbolicky (dvojka vržená na kostce, dva údery). Základní otázka zní, zda pro reprezentaci kvantity existuje jednotná sdílená neurální základna bez ohledu na formát vstupu (abstraktní reprezentace). Pokud by byl tento předpoklad pravdivý, bylo by například možné, zlepšit u dyskalkuliků prostřednictvím tréninku úloh zaměřených na aproximativní srovnávání či aproximativní aritmetiku aritmetické schopnosti s čísly nebo lépe připravit předškolní děti na výuku matematiky.

3.4.1 Abstraktní vs neabstraktní reprezentace čísla

Základním předpokladem abstraktní reprezentace čísla je, že populace neuronů, které kódují numerickou informaci, nejsou citlivé na formu vstupní

informace [Kadosh and Walsh, 2009]. Stejně populace neuronů kódují číslo bez ohledu na jeho formu (zda se jedná o arabskou číslici, římskou číslici, počet teček, slovo označující číslo...). Při abstraktní reprezentaci zároveň nezáleží na modalitě vstupní informace (vizuální, auditivní). Abstraktní reprezentace je tedy nezávislá na formě zápisu a modalitě vstupu. Informace je registrována a zpracována stejnými populacemi neuronů a je kódována v jednotném abstraktním kódu.

Pokud jsou populace neuronů kódujících numerickou kvantitu citlivé na formu vstupu (typ zápisu a modalitu), hovoříme o neabstraktní reprezentaci čísla. V tomto případě budou magnitudu arabské číslice 7 a magnitudu číslovky „sedm“ kódovat odlišné neurální populace.

3.4.2 Některé teoretické modely reprezentace čísla

Na základě získaných výzkumných dat bylo vytvořeno mnoho kognitivních modelů reprezentace čísla. V této kapitole budou zmíněny tři nejčastěji užívané modely. V současnosti je nejvíce citovaným kognitivním modelem Dehaeneův model trojího kódování ([Dehaene, 1992] – triple-code model).

Abstraktní modulární model (McCloskey, 1992 - abstract modular model)

Tento model předpokládá existenci tří samostatných systémů: převodního (comprehension system), výpočetního (calculation system) a produkčního systému (production system). Je založen na předpokladu interní abstraktní reprezentace, která nese všechny numerické operace. Všechny vstupy jsou nejdříve převodním systémem konvertovány do jednotného abstraktního kódu. Výpočetní systém obsahuje aritmetická fakta o porovnávání a početní procedury ve formě abstraktního kódu. Produkčním systémem je abstraktní kód převeden do vyžadované formy výstupu. Celý proces reprezentace tedy vyžaduje dvojí převod informace z neabstraktní na abstraktní a poté zpět na notačně a modalitně specifický výstup. Při reprezentaci odlišných vstupů by

tedy měl existovat signifikantní rozdíl celkového průměru reakčních časů kvůli odlišným časům zpracování vstupů odlišných formátů – např. na arabské číslice reagujeme rychleji než na římské [Kadosh and Walsh, 2009].

Hypotéza komplexního kódování (Camobel et al, 1994 – encoding complex hypothesis)

Jedná se o model neabstraktní reprezentace čísel. Existuje specifické kódování pro každý formát a každou modalitu vstupní informace, jedná se o samostatné procesy.

Model trojího kódování (Dehaene, 1992) Nejběžněji užívaný systém, který předpokládá existenci tří odlišných typů mentálních reprezentací čísel. Vizuální kód pro arabské číslice sídlí v levých a pravých interiovně-ventrálních okcipitálně-temporálních oblastech [Kadosh and Walsh, 2009], v němž jsou čísla reprezentována jako série číslic v prostoru. Verbální kód reprezentující čísla v podobě sekvencí slov a nacházející se v levé části oblasti okolo sulcus lateralis Sylvii (rýha mezi čelním a spánkovým lalokem). Kódující jednoduché výpočty, vybavování aritmetických faktů a počítání s číslovkami ve formě slov. Oba dva kódy jsou neabstraktní, tedy citlivé na formu zápisu a modalitu vstupu. Analogický kód pro magnitudu (analogue magnitude code), který je abstraktní, pracuje s kvantitou (magnitudou) čísla. Magnituda může být reprezentována ve formě prostorově orientované mentální číselné osy [Dehaene and Cohen, 1995]. Na této úrovni probíhá numerické porovnávání (např. že 14 je více než 30) a odhadování počtu. Zapojení jednotlivých kódů záleží na charakteristice vstupního stimulu.

3.4.3 Experimentální doklady abstraktní reprezentace čísla

Pokud budeme předpokládat, že je mentální reprezentace čísla primárně abstraktní, měly by být různé efekty související s reprezentací identické bez ohledu na formu zápisu či modalitu [Kadosh and Walsh, 2009].

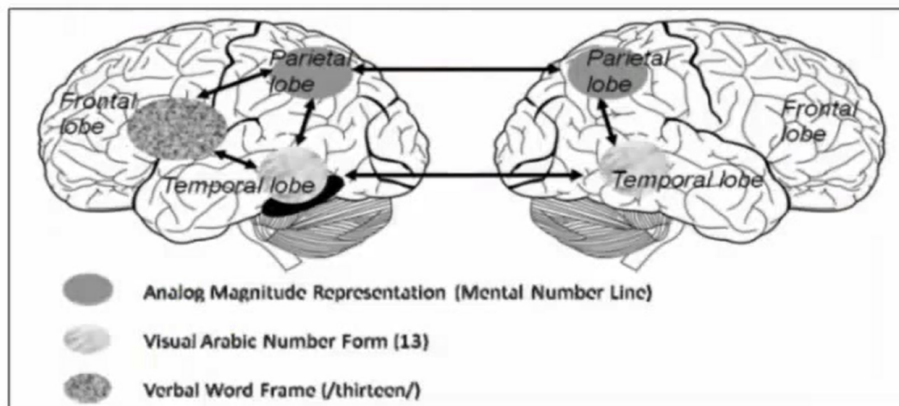


Figure 2. Triple-Code Model of Numerical Cognition Developed by Dehaene and Cohen (1995, 1997)
 Note: Shown are side views of left and right hemispheres with the postulated number representations and their connections. VWFA in black, projected onto the surface. Poor spatial resolution of earlier imaging studies, as well as limitations for the experimental designs they applied, made it hard to distinguish in more detail the cortical circuitry involved in number representation. Reviewing more recent evidence, Dehaene et al. (2003) distinguish three parietal circuits: a system associated with core quantity representation and bilaterally localized in the intraparietal regions; the left-lateralized angular gyrus for verbal number processing; and a general-purpose attention system that is localized in the posterior superior parietal regions. Figure adapted from Dehaene (2000).

Obrázek 3.3: Model trojího kódování

Jedním z těchto efektů je tzv. SNARC efekt (The spatial numerical association of response codes), který souvisí s reprezentací čísel na číselné ose. Malá čísla (většinou 1 – 5) jsou asociována s levou stranou mentální osy a je na ně odpovídáno v kratším reakčním čase levou rukou a větší čísla (6 – 9) jsou spojována s pravou stranou číselné osy a mívají kratší reakční čas odpovědi pravou rukou (podrobněji bude efekt popsán v závěrečné kapitole). Nuerk a kolegové [Nuerk et al., 2005] testovali výskyt SNARC efektu napříč notacemi a modalitami (číslovka prezentovaná jako sluchový podnět, vizuálně prezentovaná arabská číslice, vizuálně prezentovaná číslovka, vzor na hrací kostce). Z jejich výsledků vyplývá nezávislost SNARCu na formě notace a modalitě.

Dalším hojně studovaným efektem je tzv. efekt numerické vzdálenosti (numerical distance effect), který spočívá ve zvyšování reakčního času s rostoucí numerickou vzdáleností mezi dvěma čísly (např. v situaci, kdy má subjekt rozhodnout, zda je číslo 8 větší než 2 bude RT

kratší než u intervalu 8 a 6). Tento efekt poprvé popsali Moyer a Landauer v roce 1967. Na abstraktní reprezentaci čísel poukazují výsledky několika výzkumných studií demonstrujících nezávislost efektu numerické vzdálenosti na formě zápisu ([Dehaene, 1996]; [Dehaene and Akhavein, 1995]; [Schwarz and Ischebeck, 2000]).

Idea abstraktní reprezentace čísla byla podpořena rovněž mnohými studii využívajícími neurovizuální techniky, které nalézají mozkovou aktivaci v oblasti intraparietálního sulcu (IPS), která je nezávislá na formě zápisu a modalitě ([Naccache and Dehaene, 2001]; [Pinel et al., 2001]).

3.4.4 Kritika abstraktní reprezentace čísla

Cohen Kadosh a Walsh upozorňují na metodologické a teoretické limity studií podporujících ideu abstraktní reprezentace čísla, a to především na dokládání existence primární abstraktní reprezentace nulovými výsledky, na technické limity zobrazovacích metod a opatrnou interpretaci či ignorování konkurenčních výsledků [Kadosh and Walsh, 2009]. Abstraktní reprezentace je tak dle jejich názoru podložena především nulovými výsledky (nenalezení rozdílu mezi zápisy/modalitami na behaviorální či neurální úrovni) a závěry mohou být založeny na nedostatečné statistické síle výsledků či nevhodně zvoleném paradigmatu [?]. Dále upozorňují, že podobná mozková aktivace může pocházet z odlišných populací neuronů nacházejících se v těsné blízkosti, avšak konvenčními zobrazovacími technikami nedokážeme tuto aktivitu dostatečně rozlišit. Jeden voxel (objemový pixel, nejmenší zobrazená jednotka na fMRI) obsahuje okolo 1, 25 milionů neuronů, které mohou pálit v souvislosti s odlišnými funkcemi [Kadosh and Walsh, 2009]. Aktivitu jedné neurální populace tedy nemusí být snadné spolehlivě detekovat a odlišit od aktivity okolních struktur. Tento nedostatek je možné řešit snímáním neurální aktivity na úrovni buněk (tzv. single-unit recording,

single-cell recording), kdy jsou intrakraniální elektrody zaváděny přímo do mozkové tkáně, což je ovšem možné pouze u zvířecích subjektů.

Jedním z navrhovaných řešení je zaměření pozornosti na automatické procesy reprezentace a zpracování čísla. Proces je považován za automatický, pokud k jeho výkonu není potřebná vědomá kontrola [Tzelgov et al., 1996]. Užitím úloh, které jsou zpracovány automaticky, dochází k eliminaci specifických vlivů podmínek úlohy a vlivů strategií, které při intencním řešení úlohy subjekt užívá. Některé klasické studie mohou přitom být příkladem toho, jak se způsob reprezentace může měnit vlivem úlohy (např. [Bächtold et al., 1998], ruler x clock task).

3.4.5 Experimentální data dokládající existenci neabstraktní reprezentace

Podpora existence neabstraktní reprezentace je z větší části založena na zkoumání automatické reprezentace. Jedním z možných způsobů je užití paradigmatu shody velikosti (size congruity paradigm). Probandům jsou prezentovány dvě číslice lišící se fyzickou velikostí a magnitudou, každá na jedné straně vizuálního pole. Úkolem probanda je porovnat stimuly pouze na základě jejich fyzické velikosti a ignorovat přitom numerickou hodnotu čísel. Odpověď je zadávána stiskem tlačítka korespondujícím se stranou prezentace fyzicky většího stimulu. Úloha zahrnuje tři typy podmínek: kongruentní, neutrální a inkongruentní stimul. Kongruentní situace nastane, když je fyzicky větší číslo (cílové číslo) zároveň větší i numericky. Inkongruentní stimul je takový, kdy je fyzicky větší číslice numericky menší číslo. Neutrální stimuly se liší pouze velikostí – chybí vliv intervenující vlastnosti (3 3). Odpověď na inkongruentní úlohu je obvykle zpracována v delším reakčním čase než u úlohy kongruentní. Delší reakční čas indikuje intervenující vliv magnitudy čísla na zpracování úlohy. To dokládá, že je numerická hodnota čísla zpracována automaticky. Interakce mezi rozdílnými notacemi čísla a au-

tomatickým zpracováním svědčí o notačně specifické (tedy neabstraktní) reprezentaci magnitudy. Příkladem takové studie může být výzkum autorů Ito a Hatta, kteří studovali paradigma shody velikosti na příkladu japonského typu písma Kana (ekvivalent verbálních číslovek) a japonských číslic Kanji. Zatímco u písma Kana nebyl vliv efektu pozorován (informace o magnitudě nebyla automaticky zpracována), u číslic Kanji k efektu shody velikosti docházelo [Ito and Hatta, 2003].

Dalším efektem dokládajícím existenci neabstraktní reprezentace čísla je tzv. sekvenční efekt. Jedná se o snadnou úlohu numerického porovnávání. Úkolem je porovnat numerickou hodnotu dvou čísel (číslic či slov), zatímco je sledován vliv předchozí úlohy ($n-1$) na aktuální úlohu n [Kadosh et al., 2008].

Replikací úlohy zaměřené na SNARC efekt byl sledován vliv notace na SNARC. Užity byly arabské číslice, které se objevovaly horizontálně v textu a dva typy čínských číslovek ve vertikálním textu. K obvyklé interakci mezi magnitudou a odpovídající rukou došlo pouze u arabských číslic (Hung et al., 2008). Vertikální verze SNARC efektu (rychlejší odpovědi na malá čísla spodním tlačítkem a rychlejší odpovědi na velká čísla horním tlačítkem) přitom byla úspěšně demonstrována [Ito and Hatta, 2003].

Testováním numerické reprezentace za užití paradigmatu vyžadujícího intencí reprezentaci může být výchozí reprezentace ovlivněna podmínkami úlohy a užitými strategiemi na straně probanda. Experimentální design zachycující automatizované zpracování stimulů je vhodný k získání představy o výchozím nastavení reprezentace. Nálezy zmíněných studií dokládají existenci různých typů reprezentace v závislosti na podmínkách úlohy. Kadosh a Walsh [Kadosh and Walsh, 2009] pokládají abstraktní reprezentaci čísla za reakci na požadavky testové situace, nikoli výchozí nastavení. Lidské kognitivní schopnosti jsou nepochybně flexibilní a

proband dokáže reprezentaci modifikovat. Abstrakce tedy může být pouhá schopnost, která podporuje vyřešení úlohy v určité situaci.

3.5 Neurální koreláty čísla

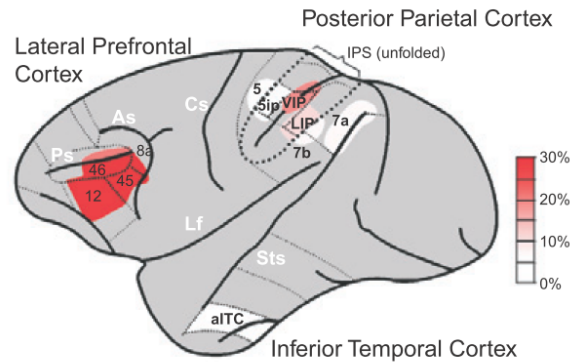
Elementární schopnosti operovat s čísly nejsou závislé na jazyce a nalezneme je u mnoha živočichů. Zvířata jsou schopna neverbálně uchopovat numerické vlastnosti (kvantitu) objektů ve vnějším světě. Studie neuroanatomických základů numerické kognice u primátů přinášejí poznatky na úrovni jednotlivých neuronů.

Za centrum reprezentace numerické kvantity je obvykle považována parietální kůra, konkrétně oblast intraparietálního sulcu (IPS). Během zpracování informace jsou aktivovány další oblasti, především prefrontální kůra, primární zraková kůra, mozeček a insula.

3.5.1 Numerické neurony

Nieder et al. ([Nieder et al., 2002], [Nieder and Miller, 2004]) sledovali aktivitu neuronů v prefrontálním a parietálním kortexu makaků během úloh porovnání numerické kvantity metodou porovnání se vzorem (matching to sample). Detekovali numerické neurony se selektivní citlivostí pro jednotlivé prezentované kvantity. Tyto neurony vykazovaly vysokou aktivitu během zpracování jedné určité magnitudy a jejich aktivita klesala se zvyšující se numerickou vzdáleností stimulu od „preferované“ magnitudy. Tyto na magnitudu selektivně laděné neurony byly ve vysoké koncentraci nalezeny v laterálním prefrontálním kortexu (LPC) a posteriorním parietálním kortexu (PPC). Numerické neurony v posteriorním parietálním kortexu (PPC) jsou rozptýleny do různých oblastí, nejhojněji jsou zastoupeny v intraparietálním sulcu (IPS).

V další studii rozlišili [Nieder and Miller, 2004] prezentaci stimulů



Obrázek 3.4: Neurální koreláty čísla – numerické neurony

na sekvenční (série teček prezentovaných za sebou jedna po druhé) a simultánní (jeden shluk teček). Sekvenční design vyžaduje sečtení stimulů v průběhu času a je tudíž kognitivně náročnější (zahrnuje vícečetné kódování, paměť a aktualizaci informací v paměti). Podobá se tak více skutečnému verbálnímu počítání u člověka (1, 2, 3, 4. . .). Neurální aktivace v IPS se lišila v závislosti na způsobu prezentace stimulu. Sekvenčně prezentovanou a simultánně prezentovanou kvantitu kódovaly dvě odlišné populace neuronů v IPS. Neurony kódující sekvenčně prezentovanou magnitudu nebyly aktivní při sériové prezentaci a opačně. V okamžiku, kdy byla prezentace stimulů ukončena a bylo nutné informaci o kvantitě uložit, byla aktivována třetí odlišná neurální populace IPS kódující informaci bez ohledu na způsob prezentace kvantit. Informace byla tedy nejdříve kódována specificky a následně konvertována do abstraktního jednotného kódu.

Reprezentace čísla v prostoru

4.1 Mentální číselné osy

Kognice čísla a prostoru je úzce propojena. Jedním z konceptů popisujících tuto interakci je tzv. hypotéza číselné osy. Tedy předpoklad, že mentální reprezentace čísel má primárně podobu horizontálně orientované číselné osy. Reprezentaci čísel na mentálních číselných osách zmiňuje již Francis Galton v roce 1880 ([Galton, 1880]). Tehdy se zabýval mentální vizualizací čísel, avšak považuje tuto schopnost spíše za výjimečné privilegium obzvláště talentovaných jedinců. Ve svých introspektivních případových studiích popisuje, jakým způsobem různí lidé automaticky mapují čísla v prostoru a vytvářejí si tak osobité modely číselných řad. Jedná se o živé představy čísel, které mají konstantní umístění v prostoru. Diagramy obvykle mapují nižší čísla po nějakou určitou interindividuálně odlišnou mezní hodnotu (např. 108, 140, 1000). Představa vyšších čísel po této mezi bývá abstraktnější a méně jasná. Ve většině případů se jedná o horizontální levostranně orientované číselné osy. Tyto modely usnadňují svým majitelům provádění aritmetických operací nebo zapamatování významných dat.

Na přiloženém obrázku pocházejícím od Galtona je znázorněno několik vlastností mentálních číselných řad. Většina popisovaných os je

horizontálních s levostrannou orientací nebo vertikálních s hodnotami rostoucími směrem nahoru. Někdy jsou spojeny s barevnou synestézií (asociace čísel nebo skupin čísel s barvou). Časté jsou předěly na úrovni desítek. Malá čísla mívají speciální status. Někdy prvních 12 čísel následuje tvar ciferníku

4.2 SNARC efekt

Dehaene et al. ([Dehaene et al., 1993]) popsali poprvé v roce 1993 SNARC efekt, který je interpretován jako jeden z hlavních behaviorálních dokladů reprezentace čísel na prostorově orientované mentální číselné ose u normální populace. V sérii úloh byla participantům prezentována čísla od 0 do 9. Úkolem probandů bylo rozhodnout, zda je prezentované číslo sudé či liché a zadat odpověď stiskem jedné ze dvou kláves. Projevila se tendence reagovat levou rukou rychleji na malá čísla a pravou rukou rychleji na velká čísla. Tento jev zůstal zachován při překřížení rukou - velká čísla nejsou spojena s pravou rukou ale s pravou stranou prostoru. Tato tendence spojovat si malá čísla s levou a větší čísla s pravou stranou prostoru byla pojmenována SNARC efekt (Spatial Numerical Association of response Codes). SNARC efekt byl posléze replikován v mnoha podobách.

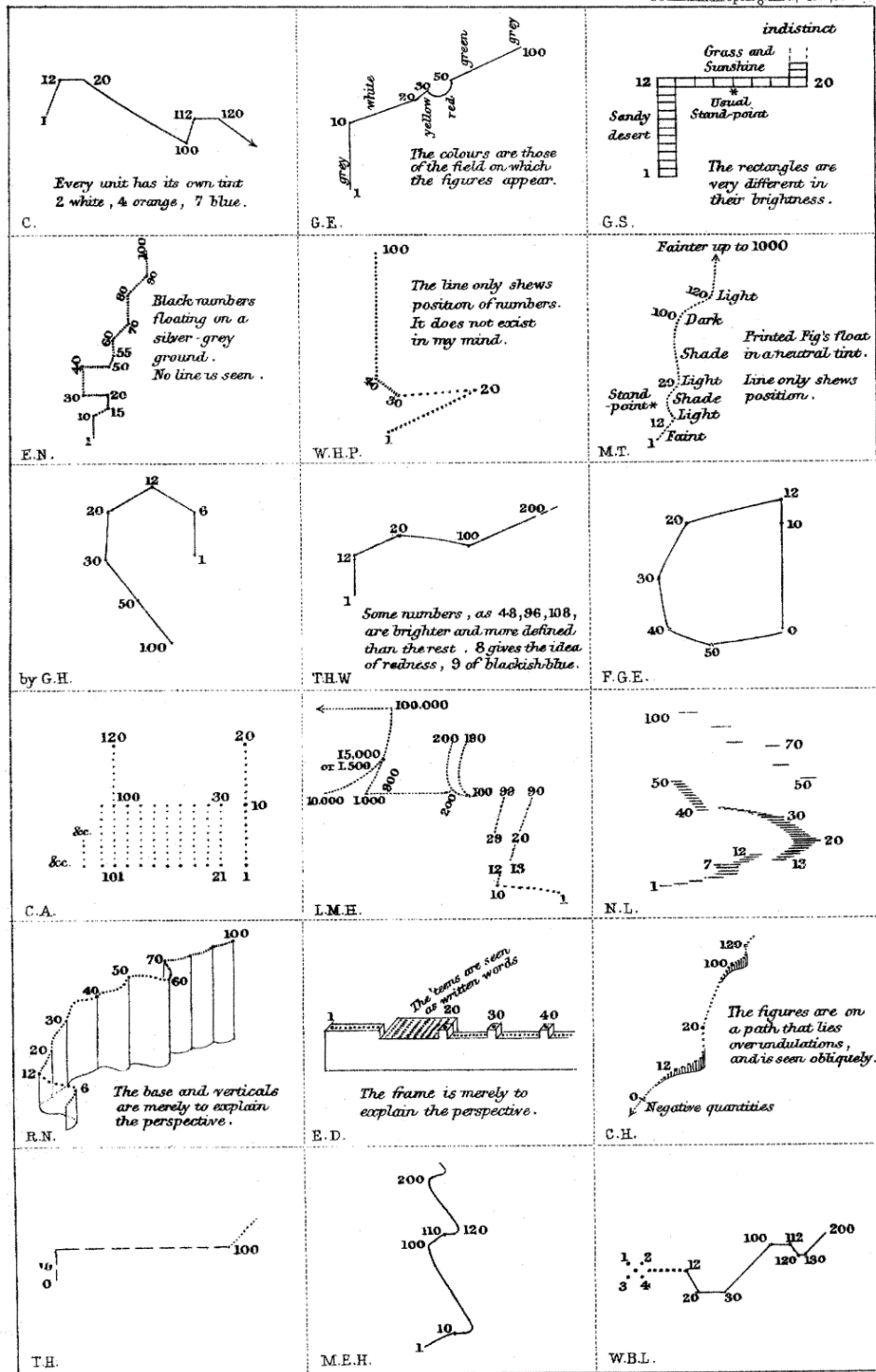
4.2.1 Replikace SNARC efektu s různými formami zápisu vstupní informace a v odlišných dimenzích

Nuerk a kolegové (Nuerk, Wood Willmes, 2005) testovali výskyt SNARC efektu napříč notacemi a modalitami (číslovka prezentovaná jako sluchový podnět, vizuálně prezentovaná arabská číslice, vizuálně prezentovaná číslovka, počet teček na hrací kostce). Z jejich výsledků vyplývá nezávislost SNARCu na formě notace a modalitě.

Dalším možným způsobem testování SNARC efektu je užití různých podob úlohy půlení mentální osy (number line bisection task).

4.2. SNARC efekt

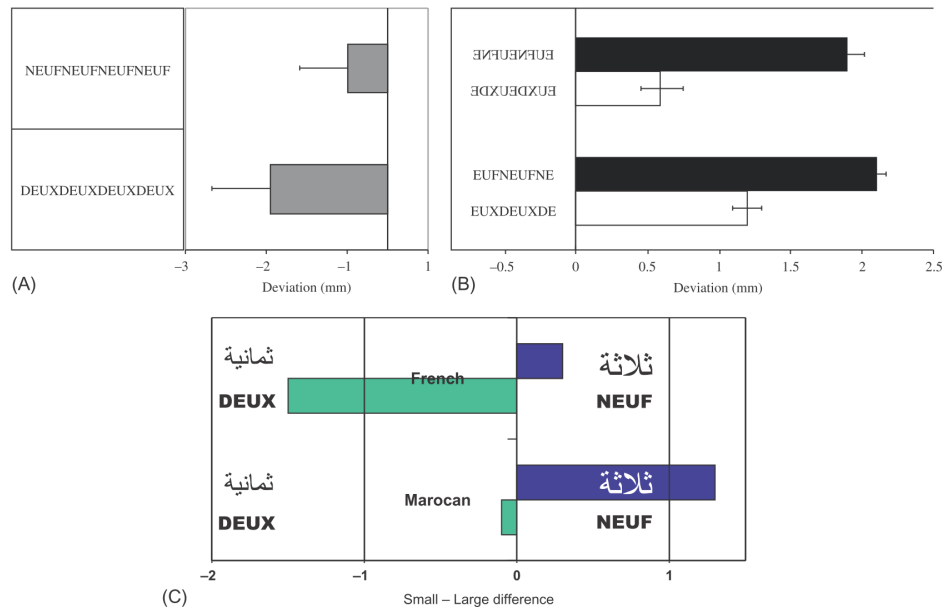
Journ. Anthropolog. Inst., Vol. X, Pt. VIII.



J.P. & W.R. Emeslie, lith.

VISUALISED NUMERALS,
by Francis Galton, F.R.S.

Obrázek 4.1: Dřevoryty mentálních číselných řad of Galtona



Obrázek 4.2: [Fischer, 2001]

V první části experimentu dělili účastníci dlouhé série arabských číslic (např. 1111111111...1111, 9999999999...9999). Z výsledků vyplývá úspěšná replikace SNARC efektu. Odpovědi na malá čísla byly zatíženy levostrannou chybovostí (probandi prokazovali tendenci ukazovat více nalevo od skutečného středu řady). U větších čísel se projevila pravostranně orientovaná chybovost (udávat střed osy více napravo od skutečného středu). Tento efekt byl zachován rovněž u řad francouzských číslovek („deuxdeuxdeux...“ x „neufneufneuf...“ – „dvědvědvě...“ x „devětdevětdevět...“) a také pro zrcadlově obrácená slova.[Fischer, 2001] [Calabria and Rossetti, 2005]

SNARC efekt je silně kontextově závislý. Ve dvou experimentálních úlohách prezentovali Bächtold et al. [Bächtold, 1998] do středu vizuálního pole arabské číslice 1 až 10 (bez čísla 6, které představovalo střední hodnotu). V první úloze indikovala čísla vzdálenost v centimetrech na pravítku (ruler task). Úkolem účastníků bylo rozhodnout, zda zobra-

zené číslo představuje vzdálenost kratší než 6 cm (a stisknout levou rukou levou klávesu) nebo delší než 6 (stisknout pravou rukou pravou klávesu). Druhá úloha vyžadovala vizuální reprezentaci čísel na ciferníku hodin (clock task). Měli levou rukou stisknout levou klávesu pro časy před 6. hodinou a pravou rukou pravou klávesu pro časy po 6. hodině. Výsledky v úloze s reprezentací pravítka ukazují klasický SNARC efekt s levostrannou orientací číselné osy. U reprezentace ciferníku došlo k modifikaci SNARC efektu – čísla byla asociována se stranou prostoru, kterou na ciferníku zaujímají.

SNARC efekt může mít podobu primingu. V tomto experimentu se probandi soustředili nejprve na fokální bod ve středu obrazovky, kterým byla číslice 1—9. Po chvíli se v levém nebo pravém horním rohu obrazovky objevil jiný znak, na který měli daným způsobem reagovat. Číslice, na kterou se prvně soustředili, byla irelevantní k jejich hlavnímu úkolu. Ukázalo se, že když se lidé dívají na malé číslo, reagují rychleji na podnět v levém horním rohu obrazovky, a když se dívají na velké číslo, reagují rychleji na podnět v pravém horním rohu. Tudíž se zdá, že malá a velká čísla způsobují upnutí více pozornosti doleva a doprava. [Fischer et al., 2003]

4.2.2 Původ levostranné orientace číselné osy – výchozí nastavení či vliv kultury?

V následující studii demonstruje Dehaene kulturní závislost SNARC efektu. [Dehaene et al., 1993] maročtí studenti, pro které byla mateřským jazykem arabština, měli obrácenou asociaci: malá čísla asociovali s pravou stranou osy a velká s levou. Tato a několik dalších modifikací replikace SNARC efektu poukazuje na skutečný původ efektu – souvislost orientace osy s dominantním způsobem psaní. Pro evropskou populaci je obvyklá asociace malých čísel s levou a velkých čísel s pravou stranou, což odpovídá způsobu čtení a psaní (zleva doprava). U národností s pravostrannou orientací psaní a čtení je asociace stran opačná. U amerických dětí se efekt začne projevovat

až kolem devíti let, což by podporovalo hypotézu že SNARC je kulturně získaný.

4.2.3 SNARC efekt jako doklad existence mentálních os?

Tyto experimenty nemusí být přímým důkazem existence mentálních číselných řad. Alternativním vysvětlením může být, že dochází k pouhému kategorickému třídění čísel na malá →vlevo, velká →vpravo. Tato jednodušší hypotéza dokáže vysvětlit velkou část ostatních experimentů kolem SNARCu. Některé experimenty ovšem naznačují, že čísla mají složitější prostorovou asociaci než pouhé kategorické levé/pravé.

Příklad. Plně plynulé uspořádání čísel bylo zkoumáno ve [Ishihara et al., 2006]. Úkolem bylo sledovat dotykovou obrazovku, na které se na náhodných pozicích objevovala čísla 1-9 a co nejrychleji klepnout pravým ukazovákem na lichá čísla. Reakční čas byl výrazně kratší u malých čísel nalevo a velkých čísel napravo a co je důležité, u čísla „5“ uprostřed. Vertikální asociace byla jen velmi slabá.

SNARC efekt není jednotně přijímán jako doklad existence prostorově orientovaných mentálních číselných řad. Santens v [Santens and Gevers, 2008] popisuje experiment naznačující, že malá/velká čísla nejsou asociována s vlevo/vpravo, ale s blízko/daleko. Někteří autoři pokládají SNARC efekt za pouhý projev strategie, kterou lidé používají k řešení podobných úloh. [Fischer, 2006]

4.3 Neurofyziologické studie

Mezi pacienty s lézí je časté současné narušení reprezentace čísla a prostoru. Např. pacienti s Gerstmannovým syndromem trpí současně dyskalkulií a poruchami orientace v prostoru, rozlišováním levé a pravé strany a agnozií prstů ruky. [Benton, 1992], [Gerstmann, 1940]

Zajímavý je případ pacientů s poškozením pravé hemisféry s levostranným neglektem, kdy dochází k ignorování levé strany prostoru. Pokud byli dotazováni na střed různých číselných intervalů (například: co je uprostřed mezi 2 a 10), odpovídali s vyššími čísly, než byla správná odpověď. Tento efekt je možné vysvětlit ignorováním levé strany mentální číselné osy. Efekt byl společně s většinou ostatních projevů neglektu eliminován prostřednictvím speciálních brýlí s optickými krystaly, které adaptovali vidění. doleva.[Vuilleumier et al., 2004] [Rossetti et al., 2004]

Mnoho fMRI studií dokládá aktivitu parietálního laloku nejen během zpracování čísel, ale i jiných vjemů – např. porovnání množství světla nebo velikosti obrazců. [Pinel et al., 2001] [Pinel et al., 2004]

Elektroencefalografie (EEG)

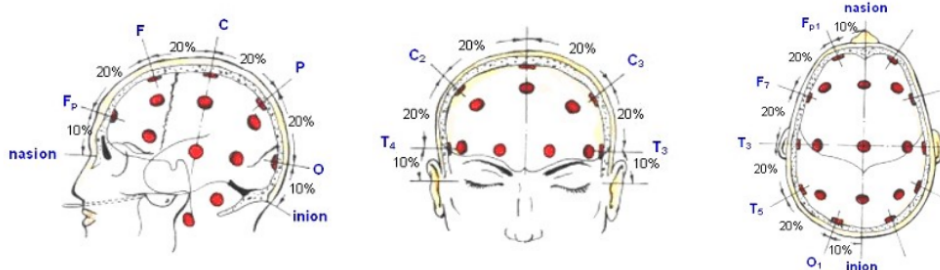
Elektroencefalografie (EEG) je technika funkčního zobrazení nervového systému, která zaznamenává změny bioelektrických potenciálů neuronů vznikajících při činnosti mozku. Elektrické potenciály z neuronů jsou snímány povrchovými elektrodami z povrchu skalpu¹. Jediná elektroda zachycuje elektrické signály z velkého množství neuronů kortexu a některých podkorových oblastí. Záznam EEG aktivity je tedy jistým souhrnem (váženou sumací) signálů, snímaných z povrchu skalpu. „Potenciálové vlny, snímané při EEG záznamech, jsou souhrnným projevem aktivity velkého množství dílčích neuronových obvodů, přičemž nejsou pouhou sumací jednotlivých aktivit, ale výslednicí složitého časoprostorového děje“ ([Kulišťák 2011]). Výstupem elektroencefalografie je grafický záznam změny signálů z většího množství elektrod (kanálů) v čase, tzv. elektroencefalogram.

5.1 Systém kladení elektrod

Nejběžněji užívaným systémem rozložení elektrod je tzv. systém desetdvacet (10-20). Systém rozložení elektrod na skalpu je založen na antropo-

¹V některých případech je možné užití do mozku zanořených intrakraniálních elektrod. Tato technika je užívaná zejména pro výzkumné účely u zvířecích subjektů. Nejedná se o standardní diagnostickou techniku především z důvodu nevratného narušení okolních neurálních struktur.

metrickém měření. Rozhodující je vzdálenost mezi spojnicemi nasion (kořen nosu) a inion (okcipitální hrbol – nejvýraznější výstupek týlní kosti na posteroinferiorní části lebky) a vzdálenost mezi ušními boltci.



Obrázek 5.1: Systém deset-dvacet

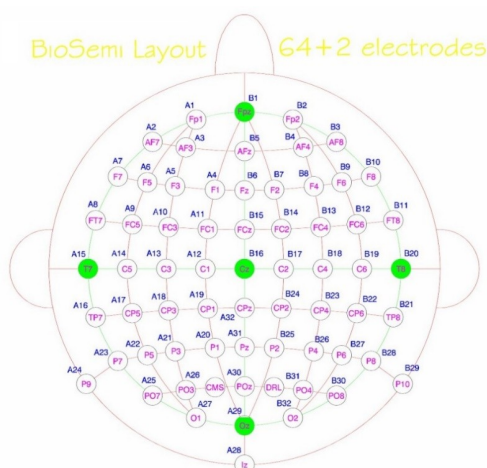
Délku těchto dvou vzdáleností naměřených v centimetrech dále rozdělujeme po 10% a 20% [Fáber, 2001]. Jednotlivé elektrody jsou od sebe vzdáleny v 10 a 20 procentních intervalech. Jedná se o mezinárodní systém užívaný v mnoha experimentálních laboratořích, jehož hlavním účelem je standardizace experimentálních podmínek a usnadnění replikace měření. Standardizovaný systém rozložení elektrod umožňuje porovnávat měření mezi subjekty a napříč laboratořemi a studii. Pro podrobnější měření lze podobným principem rozmístit i větší množství elektrod.

V naší laboratoři užíváme systém o 64 + 2 elektrodách společnosti Biosemi. Elektrody jsou zaváděny do plastových přípojek v elastické eeg čepici. Každá elektroda a příslušné místo, kam má být v čepici umístěna, jsou označeny standardizovanými názvy. Popis elektrody sestává z jednoho až dvou písmen a čísla 1 - 10 a odráží rovinu umístění (nesoucí název mozkového laloku či oblasti mezi laloky) a hemisféru. Lichými čísly (1, 3, 5, 7, 9) jsou označeny elektrody levé hemisféry a sudými čísly (2, 4, 6, 8, 10) elektrody pravé hemisféry. Tabulka 1 ilustruje označení elektrod.

5.2. Referenční elektrody

Tabulka 1: Název a umístění elektrod (systém 10-20, Biosemi 64+2)

Název	Rovina	Umístění jednotlivých elektrod
Fp	Frontální pól (prefrontální)	Fp 1 – levá hemisféra, Fp2 – pravá hemisféra, Fpz – střed
AF	Anterio-frontální	AF3, 7 – lh, AF4, 8 – ph, AFz – střed
F	Frontální	F1, 3, 5, 7 – lh, F2, 4, 6, 8 – ph, Fz – střed
FT	Frontálně-temporální	FT7 – lh, FT8 – ph
FC	Frontálně centrální	FC1, 3, 5 – lh, FC2, 4, 6 – ph, FCz – střed
C	Centrální rovina	C1, 3, 5 – lh, C2, 4, 6 – ph, Cz – střed
T	Temporální	T7 – lh, T8 – ph
TP	Temporálně-parietální	TP7 – lh, TP8 – ph
CP	Centrálně-parietální	CP1, 3, 5 – lh, CP2, 4, 6 – ph, CPz – střed
P	Parietální	P1, 3, 5, 7, 9 – lh, P2, 4, 6, 8, 10 – ph, Pz – střed
PO	Parietálně-okcipitální	PO3, 7 – lh, PO4, 8 – ph, POz – střed
O	Okcipitální	O1 – lh, O2 – ph, Oz – střed
Iz		Iz – střed



Obrázek 5.2: Rozložení elektrod na skalpu u systému 10-20, Biosemi 64+2 (zdroj: www.biosemi.com/headcap.html)

5.2 Referenční elektrody

Změny elektrického potenciálu jsou všemi elektrodami měřeny vůči referenčním elektrodám, na nichž je potenciál nulový. Referenční elektrody mohou být umístěny na různých místech, na nichž se neočekává měřená aktivita. Je tedy snímán rozdíl mezi aktivní (měřící) a referenční elektro-

dou. Referenční elektrody mohou být umístěny na ušních boltcích, mastoidech (výčnělek spánkové kosti). K referencování se rovněž využívá elektroda Cz ve středu centrální roviny. Elektrody Biosemi jsou referencovány prostřednictvím dvou samostatných přídavných elektrod CMS a DRL, jejichž záznam není zahrnut do měřeného signálu. Během přípravného zpracování signálu (preprocessing) před samotnou analýzou je dále možné referencovat vůči průměrným naměřeným hodnotám na všech elektrodách.

5.3 Měřicí elektrody

Senzorické plochy elektrod jsou vyráběny z vodivých materiálů. V případě Biosemi elektrod, které byly v rámci této práce použity, se jedná o slitinu chloridu stříbrného Ag-AgCl (http://www.biosemi.com/pin_electrode.htm).

Biosemi užívá aktivní typ elektrod. Pasivní elektrody musí být vedeny kabelem do externího zesilovacího zařízení (elektrický potenciál neuronů má hodnotu setin až desetin Voltu, elektrické potenciály snímané na povrchu skalpu jsou při vzdálenosti externí elektrody od neuronu a po průchodu kostní a kožní tkání ještě 1000x slabší). Signál je tudíž „cestou“ kontaminován různými vnějšími faktory a obsahuje šum. U pasivních elektrod musíme počítat s konstantním síťovým šumem (síťový brum) 50 Hz (platí pro západní Evropu). Dalšími rušivými vlivy mohou být různá elektronická zařízení, která kontaminují signál vedený kabely. U aktivních elektrod dochází k zesílení signálu přímo v elektrodě, čímž je délka cesty signálu k prvnímu zesílení snížena na minimum (www.biosemi.com/publications/pdf/lowcost_active_electrode_improves_resolution.pdf).

Kvalita signálu závisí na hodnotě odporu na elektrodě. Optimální hodnoty odporu (ideálně méně než 50 kilo ohmů) dosáhneme dobrým kontaktem elektrody s pokožkou skalpu pomocí vodivého elektrodového gelu. Biosemi využívá k další úpravě kvality signálu namísto prostého měření

hodnoty odporu tzv. electrode offset, který sleduje napětí na elektrodách (signál byl v této studii považován za kvalitní, pokud jednotlivé elektrody nepřekračovaly hranici napětí ± 15 mV).

5.4 EEG signál

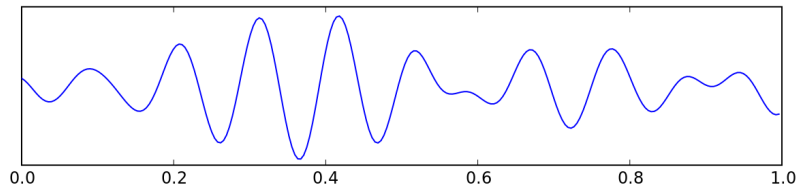
Předpokládáme, že mozková aktivita kóduje veškerou mentální činnost organismu. Měly by v ní tedy být skryty veškeré informace o vědomých i nevědomých procesech probíhajících v mysli, o kognitivních procesech, chování, prožívání, citech a emocích. EEG signál zpracováváme na úrovni frekvencí. Každý rytmus má svou specifickou frekvenci a amplitudu a je typický pro určitý typ aktivity či úroveň bdělosti a vigility. Ve stavu hlubokého spánku produkuje mozek pomalé vlny nízké frekvence s vysokou amplitudou oscilace. Pro stav bdělé pozornosti je typická rychlá aktivita s nízkou amplitudou vln [Fáber, 2001]. Při práci s EEG signálem rozeznáváme několik základních rytmů: alfa, beta, gama, delta, theta, kappa, lambda a další. V následujících odstavcích popíšu pouze rytmy klíčové pro mou práci.

5.4.1 Některé základní rytmy mozkové aktivity

Alfa aktivita

„Základní rytmus EEG zdravého, zralého (asi od 5ti až 7mi let věku) a bdícího mozku při zavřených očích je alfa aktivita, která je relativně nejvyšší amplitudy a je velmi pravidelná, podobná sinusoidě“. Frekvence alfa aktivity se pohybuje okolo 8 – 13 Hz a amplituda typicky mezi 10 – 100 mikrovolty. Alfa aktivita je běžná v okcipitální oblasti v relaxovaném, uvolněném stavu při zavřených očích a v EEG záznamu se objevuje také při únavě (často po kognitivně náročnějších úlohách, nebo pokud proband přichází unaven). Při otevření očí dochází k podstatnému snížení alfa aktivity (blokádě alfa aktivity či Bergerova reakce zástavy) a k desynchronizaci alfa rytmu [Fáber,

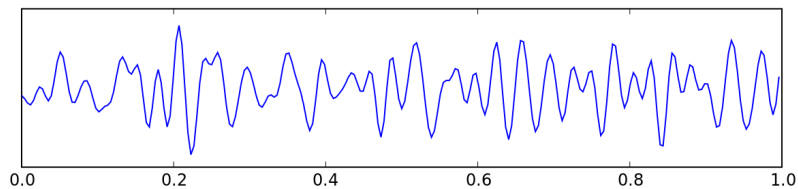
2001].



Obrázek 5.3: Rytmus alfa (zdroj: cs.wikipedia.org)

Beta aktivita

Beta rytmus o frekvenci 14 – 30 Hz a amplitudě 10 – 30 mikrovoltů je typický pro bdělý stav a motorický klid. Je spojován s koncentrací a myšlením [Misuľis and Head, 2003]. Spojuje se s aktivací CNS, se zvýšenou pozorností a napětím CNS [Mišurec and Chmelař, 1990]. Objevuje se převážně frontálně a parietálně

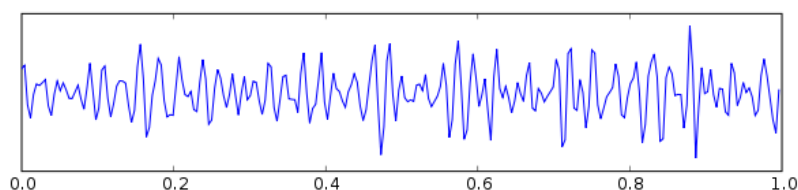


Obrázek 5.4: Rytmus beta (zdroj: cs.wikipedia.org)

Gama aktivita

Gama rytmus dosahuje frekvence 30 – 80 Hz (typicky 40 Hz) s amplitudou 2 – 10 mV (nízká gama). Vysoká gama aktivita přesahuje frekvenci \geq 80 Hz. Poprvé byla popsána v roce 1964 ve vizuálním kortexu bdělých opic [Hughes, 1964]. Byla pozorována v kůře i v podkorových strukturách. Gama aktivita je modulována vstupem sensorické informace a vnitřními procesy (např. pracovní paměť a pozornost), bývá spojována s vysokou koncentrací a kognitivní zátěží. V sensorické kůře se přítomnost gama aktivity zvyšuje

se sensorickým drivem a v souvislosti s mnoha kognitivními fenomény zahrnujícími percepční grupování a pozornost. V kortexu je gama zvýšená v souvislosti s pracovní pamětí a učením [Jia and Kohn, 2011].



Obrázek 5.5: Rytmus gama (zdroj: cs.wikipedia.org)

5.4.2 Artefakty

Jako artefakt je v EEG záznamu chápán nežádoucí signál, který nesouvisí se zkoumanou aktivitou a je vyvolán jinými biologickými faktory (např. mrkání, pocení), technickými přístroji či samotným elektrickým vedením. „Polovina umění popisovat EEG křivku je schopnost poznávat artefakty, které jsou v EEG časté, protože zesilovače pro EEG jsou velmi silné“. Faber [Fáber, 2001] rozlišuje artefakty biologické a technické. Nežádoucí artefakty jsou ze záznamu před analýzou odstraňovány manuálně či pomocí softwaru.

Biologické artefakty

Jedná se o artefakty vznikající v důsledku aktivity organismu (měřeného subjektu). Můžeme rozlišit artefakty svalové, srdeční, artefakty pohybů očních víček a očí a artefakty související s kožně galvanickým odporem kůže.

Svalové artefakty jsou vyvolané svalovou aktivitou (kontrakcí svalu). Elektrody reagují nejcitlivěji na kontrakci obličejových svalů a svalů krku, které jim jsou nejbližší (např. polykání, zatínání zubů či pohyb čelisti, pohyb jazyka, pohyb hlavy, pohyby obočí, svraštění čela). Elektrické stimuly srdeční aktivity mohou být zachyceny některými elektrodami (především

pokud jsou umístěny poblíž tepen). Vůbec nejběžnějšími artefakty jsou pohyby očních víček (mrkání) a očí. Registrujeme je především ve frontální oblasti. Poslední zmíněnou třídou jsou artefakty vznikající v důsledku měnících se kožních galvanických potenciálů zejména při pocení.

Technické artefakty

Mezi technické artefakty řadíme poruchy a nedostatky na straně elektrod, zesilovačů, samotného EEG přístroje a všech jeho komponent (časté je např. porušení drátu vedoucího signál z elektrody do sběrnice nebo poškození samotné elektrody používáním). Další artefakty mohou vznikat v souvislosti se zapojením EEG a dalších přístrojů do elektrické sítě (tzv. síťový brum). Jedná se o šum ze síťového kmitočtu vznikající v důsledku špatného uzemnění nebo nedostatečného stínění kabelů (v ČR 50 Hz, v USA 60 Hz). Síťový šum lze efektivně eliminovat použitím aktivních elektrod, jejichž součástí je již samostatný zesilovač implantovaný v každé elektrodě. Zdrojem artefaktů může být rovněž nedostatečná kvalita zapojení elektrod - špatná vodivost mezi elektrodou a pokožkou skalpu. Důvodem může být nedostatek či nadbytek elektrolytu, jeho vysychání či stékání během měření a mísení elektrodového gelu s potem z pokožky hlavy. Faber [Fáber, 2001] rozlišuje tyto technické artefakty: poruchy vedení elektrického potenciálu (vysychající elektrolyt), poruchy elektrody nebo vodivých drátů a zesilovačů, vysoký odpor pod elektrodou a síťový brum.

Výzkumná část

Úvod do výzkumné části

Výzkumná část práce je zaměřena na ověření změny gama aktivity v parietálním lobu při úlohách spojených s výpočetními operacemi na číselných řadách v kanonické (zleva doprava) a nakanonické (zprava doleva) podobě. Probandům byly prezentovány úlohy založené na mentální reprezentaci číselné osy. Následně prováděli aritmetické operace (počítání) a zaujímali perspektivu (perspective taking). Měřením EEG aktivity při prezentaci a řešení daných úloh byly zachyceny změny elektrického potenciálu v parietální oblasti mozku. Během měření byla shromažďována také behaviorální data – údaje o chybovosti a reakčních časech odpovědí na prezentované úlohy. Experiment byl realizován v Neuropsychologické laboratoři na Pedagogické fakultě v Českých Budějovicích za technické podpory zaměstnanců laboratoře.

Cíle výzkumu, výzkumné otázky a hypotézy

7.1 Cíle výzkumu

Cílem výzkumného projektu bylo nalezení a ověření behaviorálních rozdílů a odlišností v neurální aktivaci napříč dvěma typy úloh při dvou podmínkách. První úloha byla zaměřena na matematické kompetence („početní úloha“), druhá na navigaci (resp. zaujímání perspektivy). Obě úlohy měly kongruentní a inkongruentní variantu. Neurální aktivita byla snímána z povrchu skalpu prostřednictvím 64 kanálového elektroencefalografu s aktivními elektrodami.

7.2 Výzkumný problém a výzkumné otázky

Volba úloh je založena na předpokladu těsného vztahu mezi reprezentací numerické a prostorové informace, který byl demonstrován mnoha behaviorálními a neuropsychologickými studiemi. Práce studující neurokognitivní podklady reprezentace a zpracování čísla a prostoru technikami funkční magnetické rezonance (fMRI), transkraniální magnetické stimulace (TMS), transkraniální magnetické inhibice (TMI) a pozitronové emisní to-

mografie (PET) u zvířecích i lidských probandů poukazují na podobnou aktivaci blízkých neurálních regionů, především v oblasti intraparietálního sulcu (IPS) a v některých okolních strukturách (podrobněji v 5. kapitole teoretické části práce).

Role parietálního lobe se zdá být při reprezentaci prostorově uspořádaných sekvencí čísel (číselných řad) klíčová. Tento způsob interakce čísla a prostoru popisuje tzv. hypotéza číselné osy (the number line hypothesis), která je založena na předpokladu primární reprezentace čísla ve formě horizontálně orientované číselné osy. V této práci jsme se zabývali vlivem orientace číselné osy (kongruentní levo-pravá a inkongruentní pravo-levá) na reprezentaci stimulů ve dvou typech úloh zaměřených na aritmetické operace a zaujímání perspektivy.

7.3 Výzkumné otázky

Má směr orientace (kongruentní x inkongruentní) číselné osy vliv na způsob reprezentace číselných řad v aritmetických úlohách a při zaujímání perspektivy?

- Projeví se tento případný vliv v chybovosti úloh? Zvýší se průměrná chybovost u úloh s inkongruentní orientací oproti kongruentní?
- Projeví se vliv inkongruence na délce reakčních časů? Dojde vlivem inkongruence k prodloužení průměrného RT?

Jaké jsou neurální koreláty reprezentace číselných řad? Které mozkové regiony jsou v reprezentaci zapojeny?

- Nalezneme rozdíl v neurální aktivitě v parietální oblasti v závislosti na typu úlohy (početní x navigační)?
- Nalezneme rozdíl v neurální aktivitě v parietální oblasti mozku v závislosti na orientaci číselné osy (kongruentní x inkongruentní)?

7.4 Hypotézy

7.4.1 Hypotézy vztahující se k behaviorálním datům

H₁ Existuje signifikantní rozdíl v chybovosti mezi kongruentní a inkongruentní variantou početní úlohy.

H₂: Existuje signifikantní rozdíl v chybovosti mezi kongruentní a inkongruentní variantou navigační úlohy.

H₃: Existuje signifikantní rozdíl v RT mezi kongruentní a inkongruentní variantou početní úlohy.

H₄: Existuje signifikantní rozdíl v RT mezi kongruentní a inkongruentní variantou navigační úlohy.

7.4.2 Hypotézy vztahující se k EEG datům

H₅: Existuje signifikantní rozdíl v neurální aktivitě mezi výpočetní a navigační úlohou.

H₆: Existuje signifikantní rozdíl v neurální aktivitě mezi kongruentními a inkongruentními variantami úloh.

Experimentální design a etické aspekty

8.1 Výzkumná strategie

Zvolená výzkumná strategie je vzhledem k vytyčeným cílům a povaze dat kvantitativní, konkrétně se jedná o laboratorní experiment. Získaná data byla podrobena statistické analýze.

8.2 Výzkumný soubor

Do výzkumného vzorku bylo zahrnuto 24 mužů s vyhraněnou pravostrannou lateralitou. Před samotným sběrem dat bylo provedeno pilotní měření se 3 účastníky. Data z pilotního měření nebyla do vzorku zahrnuta. Pro analýzu byla použita behaviorální data všech 24 a EEG data 18 participantů. EEG záznamy šesti subjektů byly vyřazeny z následujících důvodů: nevyhovující kvalita signálu v důsledku poruchy referenčních elektrod (2 osoby), příliš mnoho svalových artefaktů (2 participantů), předčasné ukončení experimentální úlohy – technické selhání (1 osoba) a špatná kvalita signálu zapříčiněná nekvalitním zapojením elektrod (1 proband). Průměrný věk participantů byl 23, 5 let.

Výzkumný soubor byl sestaven příležitostným výběrem. Zájemci byli v první fázi výběru osloveni prostřednictvím tištěných pozvánek

vyvěšených na Pedagogické fakultě a studentských kolejiích Jihočeské Univerzity a propagace projektu na internetu (Facebook). Na druhou vlnu měření byli participantů zvaní přímým oslovením členů různých univerzitních, studijních a zájmových studentských skupin na Facebooku. Údaje o lateralitě zájemců byly získávány metodou přímého dotazování.

8.3 Měřicí technika

Mozková aktivita byla zaznamenávána elektroencefalografem značky Biosemi (Biosemi ActiveTwo system, 280 kanálů s 24 bit rozlišením) s 64 aktivními elektrodami. Zařízení využívá standardizovaný systém rozložení elektrod 10-20 se dvěma přídatnými referenčními elektrodami. Elektrody byly zapojovány do speciální elastické čepice (Biosemi, 64 channels, Medium, 10/20 layout). Do plastových rezervoárů čepice byl pro dosažení lepší vodivosti mezi elektrodou a pokožkou hlavy pod každou elektrodu aplikován elektrolytový gel. Signál byl do PC veden optickým kabelem a nahráván softwarem Biosemi ActiView.

K prezentaci úloh byl využit program Presentation společnosti Neurobehavioral Systems. Proband byl pohodlně usazen do oddělené testovací kabiny s vlastním monitorem a klávesnicí. Set výzkumných úloh spouštěl výzkumník na probandův monitor z prezentačního počítače.

8.4 Příprava experimentu

Probandy jsme před testováním podrobně seznámili s průběhem přípravy na měření a samotného měření. Byli upozorněni na aplikaci vodivého gelu na pokožku hlavy, (gel si bylo po měření možné v laboratoři omýt) a požádání, aby se v den měření vyvarovali použití stylingových přípravků do vlasů. Součástí instrukcí byla žádost o dodržení pravidelného spánkového režimu a dostatku odpočinku v noci před měřením. Poslední podmínka se

vztahovala ke konzumaci alkoholu a jiných látek ovlivňujících vědomí (vyvarovat se konzumaci alespoň 24 hodin před domluveným termínem měření).

Po podepsání měřícího protokolu s informovaným souhlasem byl participant pohodlně usazen do testovací kabinky. Příprava na měření trvala přibližně 45 – 60 minut. Nasazení EEG čepice předcházelo měření hlavy pomocí krejčovského metru a určení středu. Do čepice byly postupně zapojeny nejdříve referenční a poté měřící elektrody. Prostor mezi elektrodou a pokožkou hlavy probanda byl vyplněn vodivým elektrodovým gelem. Během zapojování byly kontrolovány rozdíly napětí na elektrodách (electrode offset). Zapojení bylo upravováno tak dlouho, dokud nebyla kvalita signálu dostatečně uspokojivá (ideální případ napětí na elektrodách se pohybuje v intervalu ± 15 mV). Po kontrole zapojení bylo zkušebně spuštěno nahrávání EEG záznamu po dobu cca 60 s.

8.5 Průběh experimentu

Participant byl seznámen s instrukcemi k úlohám (kompletní znění instrukcí viz. příloha 1). Instrukce byly hlasitě čteny z monitoru počítače a zobrazovaly se také participantům. Porozumění zadání bylo ověřováno krátkým cvičným testem o 10 úlohách. Zastoupení úloh v cvičném testu kopírovalo zastoupení v testovací verzi. Po úspěšném dokončení zkušební verze (hranice chybovosti = 20%) bylo spuštěno nahrávání společně s plnou verzí testu. Délka testování se pohybovala okolo 60 – 90 minut.

Podmínky měření byly standardizovány. Participant byl uzavřen v testovací kabině. Okna byla z důvodu eliminace rušivých vlivů z vnějšího prostředí uzavřena a zatemněna závěsy. Osvětlení místnosti bylo konstantní. Během testování jsme se snažili o udržení co největšího klidu v laboratoři a omezení rušivých podnětů na možné minimum.

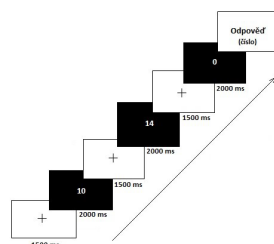
8.6 Úlohy a stimuly

8.6.1 Stimuly

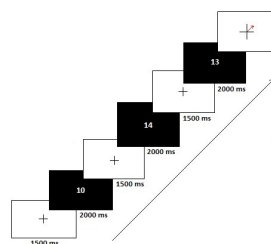
Stimulem byla čísla 6 – 19 a číslo 0 prezentovaná ve formě bílých arabských číslic na černém pozadí. Délka prezentace jednoho stimulu odpovídala 2000 ms. Prezentace stimulu byla oddělena fixačním křížem zobrazeným po dobu 1500 ms. Každá úloha sestávala ze tří sériově prezentovaných čísel (x_1 , x_2 , x_3). První dvě čísla (x_1 , $x_2 = 6 - 19$) udávají krajní hodnoty intervalu na číselné ose. Třetí stimul ($x_3 = 6 - 19$ nebo 0) určuje typ operace.

8.6.2 Typy úloh a podmínky

Subjekt řeší sérii 200 náhodně prezentovaných úloh dvou typů – početní úloha (půlení mentální číselné osy) a úloha zaujímání perspektivy. Každý typ úlohy se vyskytuje ve dvou variantách – kongruentní ($x_1 \dot{=} x_2$) a inkongruentní ($x_1 \neq x_2$). Poměr úloh je vyrovnaný ($n = 50 + 50 + 50 + 50$). Zadání odpovědi není časově omezeno. Typ operace udává třetí číslo: $x_3 = 6 - 19$ u úlohy zaujímání perspektivy, $x_3 = 0$ pro početní úlohu.



(a) Početní úloha – půlení mentální číselné osy



(b) Úloha zaujímání perspektivy

Probandům jsou sériově prezentována 3 čísla, přičemž x_1 , $x_2 =$ krajní hodnoty číselné osy, $x_3 = 0$. Třetí číslo je v tomto případě pouze ukazatelem typu operace. Úkolem je určit průměr zadaného intervalu (číslo

nacházející se v polovině zadané číselné osy). Odpovědí je číslo.

Úloha zaujímání perspektivy (perspective taking task)

Probandům jsou prezentována 3 čísla, přičemž $x_3 = 6 - 19$. Čísla x_1 a x_2 jsou krajními hodnotami číselné osy, x_1 se nachází vždy na levé straně osy bez ohledu na jeho numerickou hodnotu. Úkolem probanda je, představit si polokružnici mezi x_1 a x_2 . Čísla uvnitř intervalu se nacházejí rozprostřená na polokružnici. Proband ukazuje prostřednictvím navigačního kříže úhel k x_3 ze středu číselné osy.



(a) Řešení početní úlohy ($x_1=10$, $x_2=14$, $x_3=0$) kongruentní podmínka

(b) Řešení úlohy zaujímání perspektivy ($x_1=10$, $x_2=14$, $x_3=13$) kongruentní podmínka

8.7 Etické aspekty

Účast na experimentu byla dobrovolná a nezakládala nárok na finanční ani jinou odměnu. Účastník mohl ze své vlastní vůle měření kdykoli ukončit a odejít. Před zahájením přípravy podepsal každý účastník měřicí protokol s informovaným souhlasem (příloha). Veškerá data byla zpracována anonymně. Proband mohl požádat o zaslání výsledků studie po jejich vyhodnocení uvedením e-mailové adresy.

Po celou dobu pobytu v laboratoři bylo dbáno o maximální pohodlí účastníků. Bylo k nim přístupováno ohleduplně a byli vždy podrobně informováni o každém kroku přípravy.

Kapitola 9

Zpracování a analýza dat

V průběhu experimentu byla získávána behaviorální data a EEG záznamy. Behaviorální data byla zaznamenávána softwarem Presentation v podobě textových souborů obsahujících údaje o každé prezentované úloze (prezentované stimuly, typ úlohy, orientaci číselné osy, magnitudu číselné osy, správnou odpověď, probandovu odpověď, reakční čas). Probandi byli po ukončení měření tázáni na užité strategie při řešení úloh. Tato data však nepřinesla žádné použitelné informace

9.1 Zpracování behaviorálních dat

Prvním krokem byl převod textových souborů do tabulkového formátu. Ukázka výsledné datové matice na obrázku.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	číslo trialu	kalkulace/navigace	1. číslo	2. číslo	3. číslo	správná odpověď	zadaná odpověď	F-G	correct/incorrect	RT	typ a orientace úlohy
2	1	1	11	4	5	150	147	3	0	63212	4
3	2	0	9	15	0	12	12	0	0	42361	1
4	3	0	12	4	0	8	8	0	0	26543	2
5	4	1	11	18	13	50	61	-11	1	58239	3
6	5	1	12	17	14	72	77	-5	0	105107	3
7	6	1	9	15	14	150	142	8	0	77624	3
8	7	1	12	8	11	45	40	5	1	86760	4
9	8	0	9	3	0	6	6	0	0	29449	2
10	9	0	9	3	0	6	6	0	0	32552	2

Obrázek 9.1: Ukázka části datové matice (behaviorální data)

9.2 Zpracování EEG záznamů

EEG data měla podobu kontinuálního záznamu o délce 60 – 90 minut ve formátu BDF. Data byla zpracována pomocí softwaru Matlab společnosti MathWorks, verze 2011a v kombinaci s toolboxem pro práci s EEG daty eeglab verze 13.5.4.

9.2.1 Změna formátu

Data byla z původního BDF formátu převedena do formátu EDF aplikací Converter (Biosemi).

9.2.2 Downsampling

Druhým krokem přípravy dat k analýze byla změna vzorkovací frekvence dat z původních 2048 Hz (2048 vzorků za vteřinu) na 250 Hz (tedy pouhá osmina původních dat). Tento krok byl nutný kvůli zmenšení souboru pro výpočty.

9.2.3 Filtrování

Filtrací byly ze záznamu odstraněny frekvence nižší než 0,1 Hz a vyšší než 100 Hz (low pass = 0,1 Hz, high pass = 100 Hz), které neodpovídají žádným zkoumaným frekvenčním pásmům mozkové aktivity. Filtrování bylo nastaveno s ohledem na vysokou frekvenci gama aktivity.

9.2.4 Re-referencování

Naměřená data byla již referencována vůči dvěma referenčním elektrodám (CMS a DRL). Během přípravy dat bylo provedeno další referencování vůči průměru všech elektrod.

9.2.5 Extrakce kanálů

Z filtrovaného, re-referencovaného záznamu se sníženou vzorkovací frekvencí byly manuálně odstraněny kanály s příliš velkým množstvím šumu. Z jednoho záznamu takto mohlo být odstraněno až 5 vadných kanálů.

9.2.6 Extrakce artefaktů

Důležitým krokem je manuální odstranění všech velkých biologických i technických artefaktů. Do analýzy byly zahrnuty záznamy, u nichž po extrakci artefaktů nepřesáhl počet odstraněných událostí 20

9.2.7 Rekonstrukce událostí v EEG záznamu

Při manuálním procházení záznamů během extrakce artefaktů byl objeven problém se značkami v záznamu, které v záznamu detekují zobrazení stimulu a okamžik zadání odpovědi. Díky těmto značkám je možné spojit aktivitu v daný okamžik s událostí, která se odehrála (vidět reakci na stimul). Vlivem technické chyby, ke které došlo pravděpodobně během měření, byly události v záznamu značeny chybně. Na tomto místě bych ráda poděkovala Bc. Michaelu Tesaři za zpětnou rekonstrukci značek podle behaviorálních dat. Bez jeho několikadenní precizní práce by nebyla analýza záznamů možná. Rekonstrukci bylo nutné provést na původních nezpracovaných souborech. Tímto způsobem byly nenávratně ztraceny dva týdny předchozí práce s daty.

Poté byly opět provedeny kroky 1 – 4 (změna formátu, snížení vzorkovací frekvence, filtrace a re-referencování) avšak z časových důvodů neprošla opravená data znovu extrakcí artefaktů a chybných kanálů. Dalšími kroky bylo vytvoření událostí o délce - 0,8 sec před až 1,5 sec po prezentaci stimulu a extrakce baseline v čase - 0,8 až 0 sec.

9.2.8 Extrakce dat na základě událostí

Po úpravě dat byla z každého záznamu extrahována data podle typů událostí. To znamená, že ze záznamu jednoho subjektu byly vytvořeny 4 kategorie podle odpovídajících událostí: kalkulace kongruentní, kalkulace inkongruentní, navigace kongruentní a navigace inkongruentní. V Matlabu byla na základě těchto 4 kategorií vytvořena studie.

Analýza dat a interpretace výsledků

10.1 Statistická analýza behaviorálních dat

Pro statistickou analýzu behaviorálních dat byl použit párový T-test pro závislé vzorky. Hladina významnosti byla stanovena na $\alpha = 0,05$. K výsledné analýze byla použita behaviorální data výzkumného vzorku $n = 24$ probandů. Signifikantní rozdíl nacházíme pouze u 4. kategorie podmínek: rozdíl v reakčních časech mezi kongruentní a inkongruentní verzí navigační úlohy.

paired t-test, dependent				
	Er.calc.cong. X Er.calc.cong.	Er.nav.cong. X Er.nav.incong.	RTcalc.cong x RTcalc.incong.	RTnav.cong. X RTnav.incong
t =	1,1008	-1,8902	-1,3889	-3,1905
df =	23	23	23	23
p-value =	0,282375	0,0713955	0,17818	0,00407017

Obrázek 10.1: Výsledky párového t-testu

H₁: Existuje signifikantní rozdíl v chybovosti mezi kongruentní a inkongruentní variantou početní úlohy. **Hypotéza zamítnuta**

H₂: Existuje signifikantní rozdíl v chybovosti mezi kongruentní a inkongruentní variantou navigační úlohy. **Hypotéza zamítnuta**

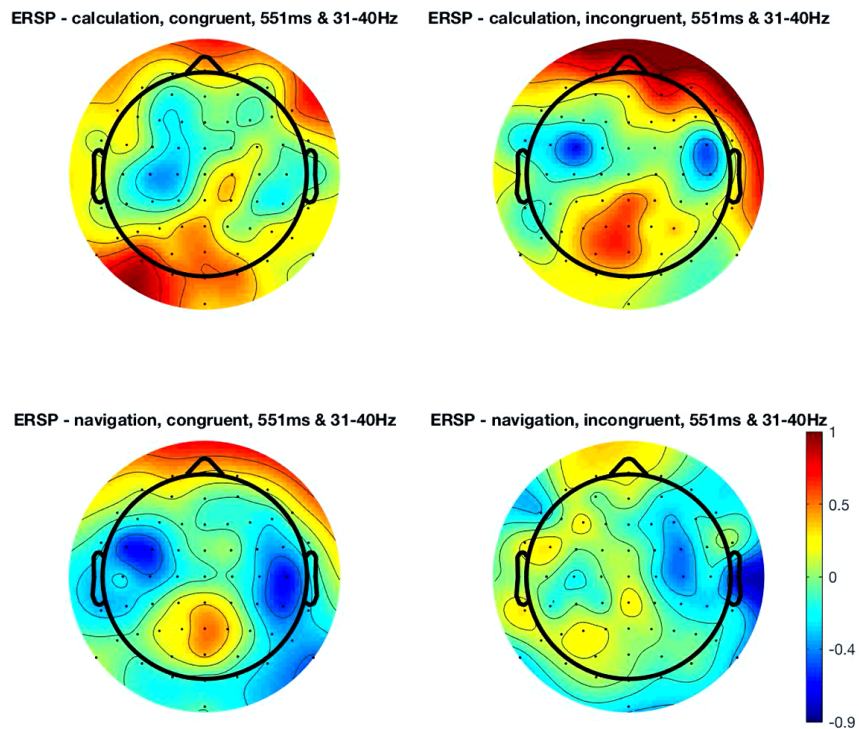
H₃: Existuje signifikantní rozdíl v RT mezi kongruentní a inkongruentní variantou početní úlohy. **Hypotéza zamítnuta**

H₄: Existuje signifikantní rozdíl v RT mezi kongruentní a inkongruentní va-

riantou navigační úlohy. **Hypotéza přijata**

10.2 Statistická analýza EEG dat

Data byla převedena do frekvenčního pásma Fourierovu transformací. Ze skalpových projekcí byla vytvořena videa v časovém úseku 0 ms před až 800 ms po prezentaci třetího čísla (x_3)



Červená barva na obrázku znázorňuje oblasti s vysokou aktivací v rámci daného frekvenčního pásma. Aktivita v přední části frontální oblasti pochází převážně z pohybů očních víček a očí. Na tomto obrázku vidíme zvýšenou aktivaci gama v některých částech parietální a okcipitální oblasti u početní úlohy. Aktivita v okcipitální oblasti může souviset se sledováním vizuálních stimulů.

Pro statistickou analýzu dat byl použit studentův t-test s FDR korekcí. Byly zjišťovány rozdíly v průměrné aktivaci v alfa, beta a gama pásmu mezi typy úloh (početní úloha x zaujímání perspektivy) a vliv inkongruence.

10.3 Výsledky

V souvislosti s EEG daty jsme testovali následující hypotézy:

H₅: Existuje signifikantní rozdíl v neurální aktivitě mezi výpočetní a navigační úlohou.

H₆: Existuje signifikantní rozdíl v neurální aktivitě mezi kongruentními a inkongruentními variantami úloh.

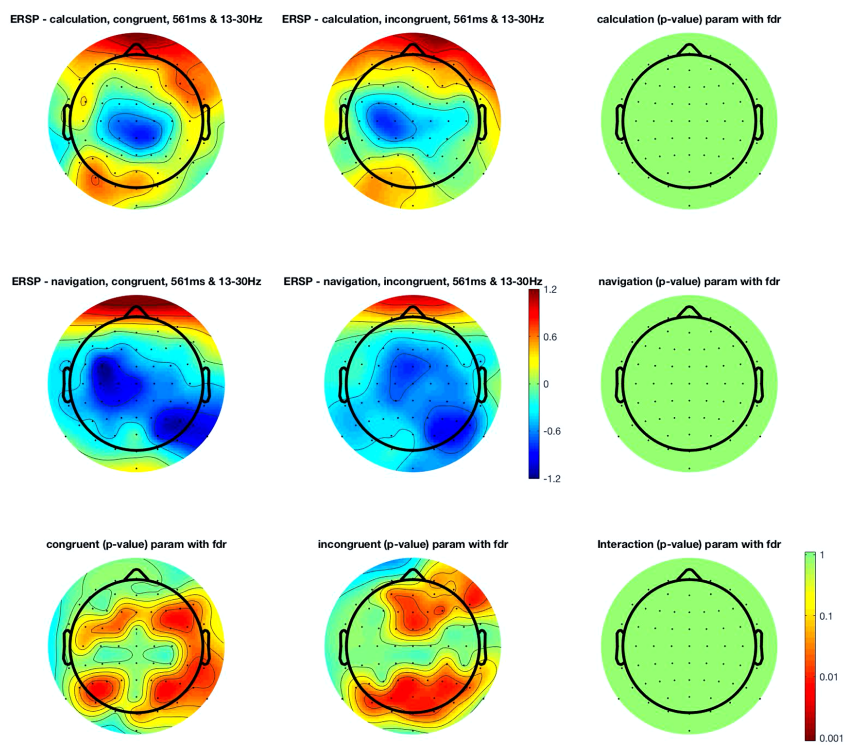
Hypotéza H₅ byla přijata pro frekvenční pásma beta a gama. Hypotéza H₆ byla zamítnuta, jelikož nebyl prokázán žádný signifikantní vliv inkongruence u žádného z pásem.

10.3.1 Beta

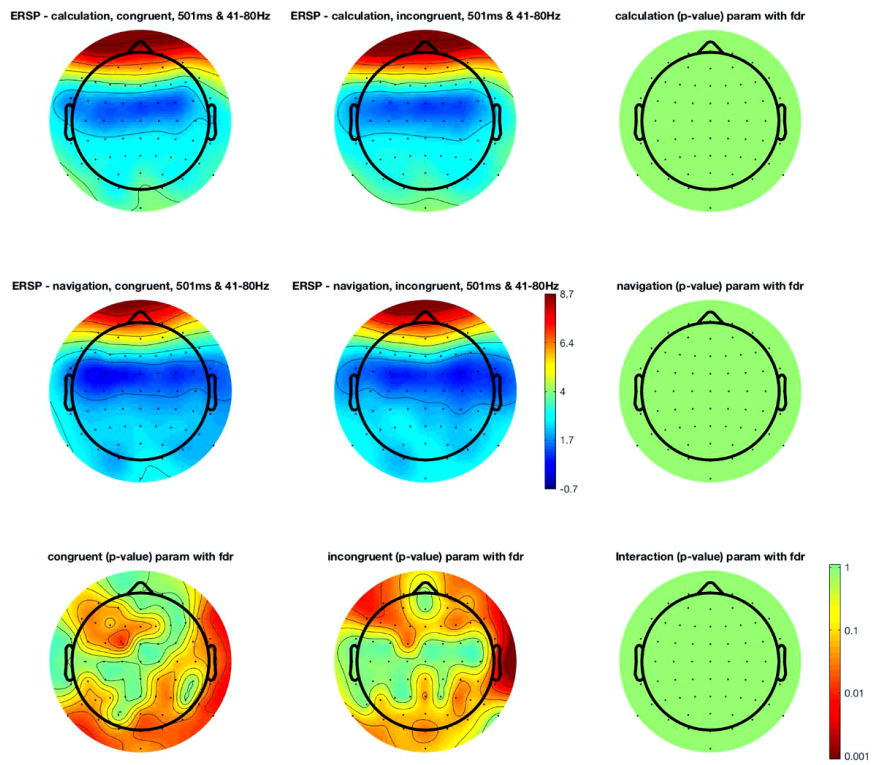
V pásmu beta sledujeme signifikantní rozdíl v aktivitě parietálních, okcipitálních a frontálních oblastí v souvislosti s typem úlohy, což svědčí o odlišném zpracování úloh. Vliv kongruence není signifikantní.

10.3.2 Gama

V pásmu gama jsme získali signifikantní rozdíl mezi aktivací u početní a navigační úlohy. Vliv inkongruence číselné osy opět není patrný. Rozdílná aktivita se projevuje v okcipitálních, parietálních a frontálních oblastech.



Obrázek 10.2: Beta aktivita



Obrázek 10.3: Gama aktivita

Diskuze

Cílem práce bylo ověřit změnu v gama aktivitě v parietální oblasti při výpočetních úlohách na číselných osách v kanonické (kongruentní) a nekanonické (inkongruentní) podobě. Za tímto účelem byly zvoleny dva typy úloh – početní úloha vyžadující určení středu číselné osy (mental number line bisection task) a úloha zaujímání perspektivy (perspective taking) pomocí přímky. Presentovanými stimuly v obou typech úloh byla pouze čísla. Zadání eliminovalo prostorovou informaci.

Behaviorální data zahrnující údaje o chybovosti a reakčních časech odpovědí daných úloh oproti našemu očekávání neprokázala signifikantní vliv inkongruentní orientace číselné osy na chybovost či reakční čas. K námi očekávanému zvýšení chybovosti u inkongruentních verzí úloh nedošlo. Vliv inkongruentní orientace osy na délku reakčního času byl prokázán pouze u navigační úlohy (silně signifikantní). Jedinou přijatou hypotézou byla hypotéza H_4 . K těmto výsledkům mohla přispět nízká náročnost úloh. Zároveň nemůže být vyloučeno užití jiných strategií na straně probandů. Početní úloha mohla být např. řešena jednoduchým výpočtem $(x_1 + x_2):2$. Není tedy jisté, zda bylo při řešení nutné užít číselnou osu. Proto nemuselo být možné sledovat vliv inkongruence. Probandi navíc mohli využít různé odlišné strategie.

Základním cílem práce bylo ověření změny gama aktivity v parietální oblasti mezi navigační a početní úlohou, čehož bylo dosaženo. Získaná data demonstrují signifikantní odlišnost v aktivitě mezi úlohami v pásmech beta a gama v parietálních oblastech. Vzhledem k technickým problémům, na které jsme v průběhu zpracování dat narazili, byla pro výslednou analýzu použita surová data (bez extrakce artefaktů a artefaktových elektrod). Kvalita výsledků byla nepříznivě ovlivněna nízkou kvalitou dat, které obsahují mnoho svalových a jiných artefaktů a šumu z nekvalitně zapojených elektrod. Odlišnost v aktivitě při řešení početní a navigační úlohy může být způsobena odlišnou strategií řešení úloh. Není například zcela jasné, zda musela být v obou úlohách použita číselná osa. Odlišnost v řešení úloh byla pravděpodobně způsobena zapojením odlišných mechanismů.

Kapitola 12

Závěr

Tato práce poskytuje základní souhrn poznatků o mentální reprezentaci čísla a jeho vztahu s reprezentací prostoru a úvod do problematiky výzkumu mentálních číselných os.

Výzkumná část práce navázala na předchozí výzkum Mgr. Michala Vavřečky, Ph.D. a byla zaměřena na ověření změny gama aktivity v parietálním lobu při úlohách spojených s výpočetními operacemi na číselných řadách v kanonické (zleva doprava) a nekanonické (zprava doleva) podobě. Oproti předchozímu výzkumu došlo k modifikaci prezentace stimulů - eliminaci prostorové informace, která mohla ovlivnit způsob práce s úlohami (volbu strategií) v předchozí studii. Získaná data demonstrují signifikantní odlišnost v aktivitě mezi úlohami v pásmech beta a gama v parietálních oblastech.

Literatura

- [Aiello et al., 2012] Aiello, M., Jacquin-Courtois, S., Merola, S., Ottaviani, T., Tomaiuolo, F., Buetti, D., Rossetti, Y., and Doricchi, F. (2012). No inherent left and right side in human 'mental number line': evidence from right brain damage. *Brain*, page aws114.
- [Bächtold et al., 1998] Bächtold, D., Baumüller, M., and Brugger, P. (1998). Stimulus-response compatibility in representational space. *Neuropsychologia*, 36(8):731–735.
- [Benton, 1992] Benton, A. L. (1992). Gerstmann's syndrome. *Archives of neurology*, 49(5):445–447.
- [Berteletti et al., 2012] Berteletti, I., Lucangeli, D., and Zorzi, M. (2012). Representation of numerical and non-numerical order in children. *Cognition*, 124(3):304–313.
- [Blair et al., 2012] Blair, K. P., Rosenberg-Lee, M., Tsang, J. M., Schwartz, D. L., and Menon, V. (2012). Beyond natural numbers: negative number representation in parietal cortex. *Frontiers in human neuroscience*, 6:7.
- [Bonato et al., 2012] Bonato, M., Zorzi, M., and Umiltà, C. (2012). When time is space: evidence for a mental time line. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(10):2257–2273.

- [Brannon et al., 2001] Brannon, E. M., Wusthoff, C. J., Gallistel, C., and Gibbon, J. (2001). Numerical subtraction in the pigeon: Evidence for a linear subjective number scale. *Psychological Science*, 12(3):238–243.
- [Butterworth, 1999] Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. Macmillan.
- [Calabria and Rossetti, 2005] Calabria, M. and Rossetti, Y. (2005). Interference between number processing and line bisection: a methodology. *Neuropsychologia*, 43(5):779–783.
- [Cantlon and Brannon, 2005] Cantlon, J. F. and Brannon, E. M. (2005). Semantic congruity affects numerical judgments similarly in monkeys and humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(45):16507–16511.
- [Cantlon and Brannon, 2006] Cantlon, J. F. and Brannon, E. M. (2006). Shared system for ordering small and large numbers in monkeys and humans. *Psychological Science*, 17(5):401–406.
- [Cantlon and Brannon, 2007] Cantlon, J. F. and Brannon, E. M. (2007). Basic math in monkeys and college students. *PLoS Biol*, 5(12):e328.
- [Cantlon et al., 2009] Cantlon, J. F., Platt, M. L., and Brannon, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in cognitive sciences*, 13(2):83–91.
- [Capaldi and Miller, 1988] Capaldi, E. and Miller, D. J. (1988). Counting in rats: Its functional significance and the independent cognitive processes that constitute it. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 14(1):3.
- [Conson et al., 2008] Conson, M., Cinque, F., and Trojano, L. (2008). The two sides of the mental clock: The imaginal hemispacial effect in the healthy brain. *Brain and cognition*, 66(3):298–305.

-
- [Conson et al., 2009] Conson, M., Mazzarella, E., and Trojano, L. (2009). Numbers are represented in egocentric space: effects of numerical cues and spatial reference frames on hand laterality judgements. *Neuroscience letters*, 452(2):176–180.
- [Cooper, 1975] Cooper, L. A. (1975). Mental rotation of random two-dimensional shapes. *Cognitive psychology*, 7(1):20–43.
- [Dacke and Srinivasan, 2008] Dacke, M. and Srinivasan, M. V. (2008). Evidence for counting in insects. *Animal cognition*, 11(4):683–689.
- [Davis and Bradford, 1986] Davis, H. and Bradford, S. A. (1986). Counting behavior by rats in a simulated natural environment. *Ethology*, 73(4):265–280.
- [De Hevia and Spelke, 2010] De Hevia, M. D. and Spelke, E. S. (2010). Number-space mapping in human infants. *Psychological Science*, 21(5):653–660.
- [Dehaene, 1992] Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2):1–42.
- [Dehaene, 1996] Dehaene, S. (1996). The organization of brain activations in number comparison: Event-related potentials and the additive-factors method. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(1):47–68.
- [Dehaene, 1997] Dehaene, S. (1997). *The number sense: How the mind creates mathematics*. Oxford University Press.
- [Dehaene, 2001] Dehaene, S. (2001). Subtracting pigeons: logarithmic or linear? *Psychological science*, 12(3):244–246.

- [Dehaene and Akhavein, 1995] Dehaene, S. and Akhavein, R. (1995). Attention, automaticity, and levels of representation in number processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(2):314.
- [Dehaene et al., 1993] Dehaene, S., Bossini, S., and Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3):371.
- [Dehaene and Brannon, 2011] Dehaene, S. and Brannon, E. (2011). *Space, time and number in the brain: Searching for the foundations of mathematical thought*. Academic Press.
- [Dehaene and Cohen, 1995] Dehaene, S. and Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical cognition*, 1(1):83–120.
- [Dehaene et al., 2004] Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., and Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current opinion in neurobiology*, 14(2):218–224.
- [Dehaene et al., 2003] Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., and Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive neuropsychology*, 20(3-6):487–506.
- [Eger et al.,] Eger, E. S., Russ, P., Giraud, M., and Kleinschmidt, A. A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, 37:719–725.
- [Fáber, 2001] Fáber, J. (2001). *Elektroencefalografie a psychofyziologie*. 1. vyd., Praha, IVS nakladatelství, 2001, 170 s. Technical report, ISBN 80-858-6674-9.
- [Feigenson et al., 2004] Feigenson, L., Dehaene, S., and Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in cognitive sciences*, 8(7):307–314.

-
- [Fischer, 2001] Fischer, M. H. (2001). Number processing induces spatial performance biases. *Neurology*, 57(5):822–826.
- [Fischer, 2006] Fischer, M. H. (2006). The future for snarc could be stark. . . . *Cortex*, 42(8):1066–1068.
- [Fischer et al., 2003] Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., and Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature neuroscience*, 6(6):555–556.
- [Formisano et al., 2002] Formisano, E., Linden, D. E., Di Salle, F., Trojano, L., Esposito, F., Sack, A. T., Grossi, D., Zanella, F. E., and Goebel, R. (2002). Tracking the mind’s image in the brain i: time-resolved fmri during visuospatial mental imagery. *Neuron*, 35(1):185–194.
- [Gallistel and Gelman, 2000] Gallistel, C. R. and Gelman, R. (2000). Non-verbal numerical cognition: From reals to integers. *Trends in cognitive sciences*, 4(2):59–65.
- [Galton, 1880] Galton, F. (1880). Visualised numerals. *Nature*, 21(533):252–256.
- [Gerstmann, 1940] Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia: local diagnostic value. *Archives of Neurology & Psychiatry*, 44(2):398–408.
- [Gevers et al., 2006] Gevers, W., Ratinckx, E., De Baene, W., and Fias, W. (2006). Further evidence that the snarc effect is processed along a dual-route architecture: Evidence from the lateralized readiness potential. *Experimental psychology*, 53(1):58–68.
- [Gibbon and Church, 1981] Gibbon, J. and Church, R. M. (1981). Time left: linear versus logarithmic subjective time. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 7(2):87.

- [Göbel et al., 2011] Göbel, S. M., Shaki, S., and Fischer, M. H. (2011). The cultural number line: a review of cultural and linguistic influences on the development of number processing. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 42(4):543–565.
- [Halberda and Feigenson, 2008] Halberda, J. and Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the „number sense“: The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental psychology*, 44(5):1457.
- [Hartl and Hartlová, 2015] Hartl, P. and Hartlová, H. (2015). *Psychologický slovník*. Portál.
- [Hauser and Spelke, 2004] Hauser, M. D. and Spelke, E. (2004). Evolutionary and developmental foundations of human knowledge. *The cognitive neurosciences*, 3:853–864.
- [Hegarty and Waller, 2004] Hegarty, M. and Waller, D. (2004). A dissociation between mental rotation and perspective-taking spatial abilities. *Intelligence*, 32(2):175–191.
- [Hubbard et al., 2005] Hubbard, E. M., Piazza, M., Pinel, P., and Dehaene, S. (2005). Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(6):435–448.
- [Hughes, 1964] Hughes, J. R. (1964). Responses from the visual cortex of unanesthetized monkeys. *International review of neurobiology*, 7:99–152.
- [Ishihara et al., 2006] Ishihara, M., Jacquin-Courtois, S., Flory, V., Salemme, R., Imanaka, K., and Rossetti, Y. (2006). Interaction between space and number representations during motor preparation in manual aiming. *Neuropsychologia*, 44(7):1009–1016.

- [Ito and Hatta, 2003] Ito, Y. and Hatta, T. (2003). Semantic processing of arabic, kanji, and kana numbers: Evidence from interference in physical and numerical size judgments. *Memory & cognition*, 31(3):360–368.
- [Jia and Kohn, 2011] Jia, X. and Kohn, A. (2011). Gamma rhythms in the brain. *PLoS Biol*, 9(4):e1001045.
- [Johnson and Munakata, 2005] Johnson, M. H. and Munakata, Y. (2005). Processes of change in brain and cognitive development. *Trends in cognitive sciences*, 9(3):152–158.
- [Kadosh et al., 2008] Kadosh, R. C., Lammertyn, J., and Izard, V. (2008). Are numbers special? an overview of chronometric, neuroimaging, developmental and comparative studies of magnitude representation. *Progress in neurobiology*, 84(2):132–147.
- [Kadosh and Walsh, 2009] Kadosh, R. C. and Walsh, V. (2009). Numerical representation in the parietal lobes: abstract or not abstract? *Behavioral and brain sciences*, 32(3-4):313–328.
- [Keehner et al., 2006] Keehner, M., Guerin, S. A., Miller, M. B., Turk, D. J., and Hegarty, M. (2006). Modulation of neural activity by angle of rotation during imagined spatial transformations. *Neuroimage*, 33(1):391–398.
- [Koehler, 1941] Koehler, O. (1941). *Vom Erlernen unbenannter Anzahlen bei Vögeln (On the learning of unnamed numerosities by birds)*, pages 201–218. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Lambrey et al., 2012] Lambrey, S., Doeller, C., Berthoz, A., and Burgess, N. (2012). Imagining being somewhere else: neural basis of changing perspective in space. *Cerebral cortex*, 22(1):166–174.
- [Leon and Gallistel, 1998] Leon, M. I. and Gallistel, C. (1998). Self-stimulating rats combine subjective reward magnitude and subjective re-

- ward rate multiplicatively. *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 24(3):265.
- [Libertus et al., 2011] Libertus, M. E., Feigenson, L., and Halberda, J. (2011). Preschool acuity of the approximate number system correlates with school math ability. *Developmental science*, 14(6):1292–1300.
- [Lourenco and Longo, 2010] Lourenco, S. F. and Longo, M. R. (2010). General magnitude representation in human infants. *Psychological Science*.
- [Miller et al., 2003] Miller, E. K., Nieder, A., Freedman, D. J., and Wallis, J. D. (2003). Neural correlates of categories and concepts. *Current opinion in neurobiology*, 13(2):198–203.
- [Misulis and Head, 2003] Misulis, K. E. and Head, T. C. (2003). *Essentials of clinical neurophysiology*, volume 1. Garland Science.
- [Mišurec and Chmelař, 1990] Mišurec, J. and Chmelař, M. (1990). *Elektroencefalografie*. IDV SZP.
- [Moyer and Landauer, 1973] Moyer, R. and Landauer, T. (1973). Determinants of reaction time for digit inequality judgments. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 1(3):167–168.
- [Moyer and Bayer, 1976] Moyer, R. S. and Bayer, R. H. (1976). Mental comparison and the symbolic distance effect. *Cognitive Psychology*, 8(2):228–246.
- [Moyer and Landauer, 1967] Moyer, R. S. and Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality.
- [Naccache and Dehaene, 2001] Naccache, L. and Dehaene, S. (2001). Unconscious semantic priming extends to novel unseen stimuli. *Cognition*, 80(3):215–229.

-
- [Nieder, 2005] Nieder, A. (2005). Counting on neurons: the neurobiology of numerical competence. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(3):177–190.
- [Nieder et al., 2002] Nieder, A., Freedman, D. J., and Miller, E. K. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science*, 297(5587):1708–1711.
- [Nieder and Merten, 2007] Nieder, A. and Merten, K. (2007). A labeled-line code for small and large numerosities in the monkey prefrontal cortex. *The Journal of neuroscience*, 27(22):5986–5993.
- [Nieder and Miller, 2003] Nieder, A. and Miller, E. K. (2003). Coding of cognitive magnitude: Compressed scaling of numerical information in the primate prefrontal cortex. *Neuron*, 37(1):149–157.
- [Nieder and Miller, 2004] Nieder, A. and Miller, E. K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101(19):7457–7462.
- [Nuerk et al., 2005] Nuerk, H.-C., Wood, G., and Willmes, K. (2005). The universal snarc effect: The association between number magnitude and space is amodal. *Experimental psychology*, 52(3):187–194.
- [Paivio and Csapo, 1973] Paivio, A. and Csapo, K. (1973). Picture superiority in free recall: Imagery or dual coding? *Cognitive psychology*, 5(2):176–206.
- [Park and Brannon, 2014] Park, J. and Brannon, E. M. (2014). Improving arithmetic performance with number sense training: An investigation of underlying mechanism. *Cognition*, 133(1):188–200.

- [Pica et al., 2004] Pica, P., Lemer, C., Izard, V., and Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an amazonian indigene group. *Science*, 306(5695):499–503.
- [Pinel et al., 2001] Pinel, P., Dehaene, S., Riviere, D., and LeBihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *Neuroimage*, 14(5):1013–1026.
- [Pinel et al., 2004] Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., and Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41(6):983–993.
- [Riello and Rusconi, 2011] Riello, M. and Rusconi, E. (2011). Unimanual snarc effect: hand matters. *Handy numbers: finger counting and numerical cognition*, page 95.
- [Rossetti et al., 2011] Rossetti, Y., Jacquin-Courtois, S., Aiello, M., Ishihara, M., Brozzoli, C., and Doricchi, F. (2011). Neglect 'around the clock': dissociating number and spatial neglect in right brain damage. *Space, time and number in the brain: Searching for the foundations of mathematical thought*, pages 149–173.
- [Rossetti et al., 2004] Rossetti, Y., Jacquin-Courtois, S., Rode, G., Ota, H., Michel, C., and Boisson, D. (2004). Does action make the link between number and space representation? visuo-manual adaptation improves number bisection in unilateral neglect. *Psychological Science*, 15(6):426–430.
- [Santens and Gevers, 2008] Santens, S. and Gevers, W. (2008). The snarc effect does not imply a mental number line. *Cognition*, 108(1):263–270.
- [Schwarz and Ischebeck, 2000] Schwarz, W. and Ischebeck, A. (2000). Sequential effects in number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 26(5):1606.

- [Shaki et al., 2012] Shaki, S., Petrusic, W. M., and Leth-Steensen, C. (2012). Snarc effects with numerical and non-numerical symbolic comparative judgments: instructional and cultural dependencies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(2):515.
- [Shepard and Metzler, 1992] Shepard, R. and Metzler, J. (1992). Mental rotation of three-dimensional objects. *The Philosophy of Mind: Classical Problems/contemporary Issues*, page 217.
- [Shepard and Cooper, 1986] Shepard, R. N. and Cooper, L. A. (1986). *Mental images and their transformations*. The MIT Press.
- [Srinivasan and Carey, 2010] Srinivasan, M. and Carey, S. (2010). The long and the short of it: on the nature and origin of functional overlap between representations of space and time. *Cognition*, 116(2):217–241.
- [Sumitani et al., 2014] Sumitani, M., Misaki, M., Kumagaya, S., Ogata, T., Yamada, Y., and Miyauchi, S. (2014). Dissociation in accessing space and number representations in pathologic pain patients. *Brain and cognition*, 90:151–156.
- [Thompson, 1968] Thompson, N. S. (1968). Counting and communication in crows. *Communications in Behavioral Biology*, 2:223–225.
- [Tzelgov et al., 1996] Tzelgov, J., Henik, A., Sneg, R., and Baruch, O. (1996). Unintentional word reading via the phonological route: The stroop effect with cross-script homophones. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 22(2):336.
- [Ujfalussy et al., 2014] Ujfalussy, D. J., Miklósi, Á., Bugnyar, T., and Kotrschal, K. (2014). Role of mental representations in quantity judgments by jackdaws (*corvus monedula*). *Journal of Comparative Psychology*, 128(1):11–20.

-
- [Viarouge et al., 2014] Viarouge, A., Hubbard, E. M., and Dehaene, S. (2014). The organization of spatial reference frames involved in the snarc effect. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8):1484–1499.
- [Vuilleumier et al., 2004] Vuilleumier, P., Ortigue, S., and Brugger, P. (2004). The number space and neglect. *Cortex*, 40(2):399–410.
- [Walsh, 2003] Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in cognitive sciences*, 7(11):483–488.
- [Wolbers and Hegarty, 2010] Wolbers, T. and Hegarty, M. (2010). What determines our navigational abilities? *Trends in cognitive sciences*, 14(3):138–146.
- [Woodbridge et al., 2013] Woodbridge, R., Chechlacz, M., Humphreys, G. W., and Demeyere, N. (2013). Neuro-anatomical correlates of a number bisection bias: A neuropsychological voxel-based morphometry study. *NeuroImage: Clinical*, 2:143–150.
- [Zhao et al., 2012] Zhao, H., Chen, C., Zhang, H., Zhou, X., Mei, L., Chen, C., Chen, L., Cao, Z., and Dong, Q. (2012). Is order the defining feature of magnitude representation? an erp study on learning numerical magnitude and spatial order of artificial symbols. *PloS one*, 7(11):e49565.

Appendix

Seznam příloh

- Seznam obrázků
- Zadání instrukcí
- Formulář informovaného souhlasu
- Zadání bakalářské práce

Seznam obrázků

2.1	Schéma významů pojmu číslo (autor Petra Janíčková, inspirováno literaturou a přednáškami doc. Ing. Ivana Havla, CSc., Ph.D.)	10
3.1	Ilustrace úlohy aproximativního numerického srovnávání a aproximativní aritmetiky (zdroj: převzato z Park Brannon, 2014) . . .	15
3.2	Matching to sample numerosity task (zdroj: Ditz Nieder, 2016) .	16
3.3	Model trojího kódování	21
3.4	Neurální koreláty čísla – numerické neurony	26
4.1	Dřevoryty mentálních číselných řad of Galtona	29
4.2	[Fischer, 2001]	30
5.1	Systém deset-dvacet	35
5.2	Rozložení elektrod na skalpu u systému 10-20, Biosemi 64+2 (zdroj: www.biosemi.com/headcap.html)	36
5.3	Rytmus alfa (zdroj: cs.wikipedia.org)	39
5.4	Rytmus beta (zdroj: cs.wikipedia.org)	39
5.5	Rytmus gama (zdroj: cs.wikipedia.org)	40
9.1	Ukázka části datové matice (behaviorální data)	52

10.1	Výsledky párového t-testu	56
10.2	Beta aktivita	59
10.3	Gama aktivita	60

Zadání instrukcí pro experiment Number lines 2

"Dobrý den, vítíte u testování experimentu pro mou bakalářskou práci. Na další obrazovce se dozvíte, jak bude experiment probíhat. Pokud máte nyní nějaké otázky, ptejte se. Experiment trvá zhruba 60 - 80 minut a kdykoli jej můžete bez udání důvodu ukončit. Jako účastník experimentu nemáte nárok na finanční odměnu. Smluvenou odměnou je v tomto případě sdělení výsledků experimentu, případně záznam konkrétního měření. Pro pokračování stiskněte MEZERNIK."

"Nyní uvidíte řady čísel. Pokud je poslední číslo nula, spočítejte průměr dvou předchozích čísel a uveďte jej jako svoji odpověď. Na odpověď máte neomezený čas. Pokud je poslední třetí číslo jiné než nula, představte si půlkruh, na kterém je vlevo první z dvou prezentovaných čísel a vpravo druhé z prezentovaných čísel. Stojíte uprostřed tohoto půlkruhu a Vaším úkolem je ukázat na poslední třetí číslo tam, kde by se ono číslo nacházelo, pokud bychom napnuli číselnou řadu na půlkruhu. Máte-li otázky k úloze, zeptejte se výzkumníka. Pokud je Vám vše jasné, pokračujte stisknutím MEZERNIKU."

"Připravte se, experiment začíná."