

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI
KATEDRA OPTIKY

**VLIV MULTISENZORICKÝCH ASOCIACÍ NA
EFEKTIVITU PLEOPTICKÉ STIMULACE**

Diplomová práce

VYPRACOVALA:

Bc. Lucie Jeřábková

obor 5345T008 OPTOMETRIE

studijní rok 2021/2022

VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE:

doc. RNDr. Mgr. František Pluháček, Ph.D.

KONZULTANT DIPLOMOVÉ PRÁCE:

MUDr. Miroslav Dostálek, Ph.D., MSc

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. RNDr. Mgr. Františka Pluháčka, Ph.D. za použití literatury uvedené v závěru práce.

V Olomouci dne 26. 4. 2022

.....
Bc. Lucie Jeřábková

Poděkování

Chtěla bych moc poděkovat svému vedoucímu diplomové práce panu doc. RNDr. Mgr. Františku Pluháčkovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost, cenné rady, ochotu a čas, které mi při vypracování poskytl. A také za vytvoření optotypu s noniem a trpělivost při jeho instalaci.

Také bych ráda poděkovala svému konzultantovi panu MUDr. Miroslavu Dostálkovi, Ph.D., MSc., za odbornou a aktivní pomoc při konstruování multisenzorického stimulu. Mé poděkování patří také celému pracovnímu týmu Centra dětské oftalmologie BINOCULAR s.r.o. a Oční optiky SILOE za vstřícnost, podporu, technické zázemí a možnosti vytvoření obrazové dokumentace k této práci, jmenovitě nejvíce Mgr. et Bc. Barboře Čáslavské, Bc. Karolíně Lebedové a Dagmar Košňárové.

Dále bych ráda zmínila Bc. Štěpána Brýdla, Bc. Tomáše Janeckého a Bc. Davida Štegnera, kteří mi poskytli velkou technickou podporu, při konstrukci stimulu a projekci optotypu. Dále bych ráda poděkovala Bc. Kateřině Lebedové, Mgr. Anně Jeřábkové a Magdaléně Jeřábkové za neutuchající psychickou podporu.

Tato práce byla vytvořena za podpory projektů IGA PřF UP v Olomouci č. IGA_PrF_2021_012 a IGA_PrF_2022_010.

Obsah

Úvod	6
1 Amblyopie	7
1.1 Pleoptika.....	8
1.1.1 Atropinové kapky	8
1.1.2 Okluzní terapie.....	8
1.1.3 Pleoptická cvičení	9
1.1.4 Nová pleoptická cvičení a přístupy.....	12
1.2 Neurální mechanismy amblyopie.....	13
1.2.1 Narušení mozkových struktur vlivem amblyopie.....	13
1.2.2 Zraková neuroplasticita a její klinické důsledky v léčbě amblyopie	14
2 Elementární mentální procesy	16
2.1 Pozornost.....	17
2.1.1 Vizuelní pozornost.....	17
2.1.2 Sluchová pozornost.....	19
2.1.3 Interakce mezi sluchovou a zrakovou pozorností.....	20
2.2 Emoce a motivace	22
2.2.1 Emoce	22
2.2.2 Motivace	23
3 Vnímání	25
3.1 Zrakové vnímání	25
3.1.1 Procesy zpracování vizuelní informace	25
3.1.2 Procesy ovlivňující zrakové vnímání.....	31
3.2 Vnímání sluchu	32
3.2.1 Prostorové slyšení	32
3.2.2 Dopplerův efekt při vnímání směru pohybujících se zdrojů zvuku.	33
4 Multisenzorická integrace	35

4.1	Multisenzorická integrace a neuroplasticita.....	35
4.1.1	Multisenzorický mozek.....	36
4.1.2	Multisenzorická plasticita.....	38
4.1.3	Účinky multisenzorického tréninku na neuroplasticitu.....	41
4.1.4	Funkční rámce multisenzorické plasticity.....	42
5	Multisenzorické učení.....	45
5.1	Multisenzorická facilitace unisenzorického učení.....	46
5.1.1	Mechanismy multisenzorické facilitace.....	46
5.2	Význam kongruence.....	47
5.3	Získávání nových multisenzorických asociací.....	48
5.4	Multisenzorická facilitace paměti.....	49
5.5	Metody multisenzorického učení.....	49
6	Vliv multisenzorických asociací na efektivitu pleoptické stimulace.....	51
6.1	Charakteristika výzkumného souboru.....	51
6.2	Metody a průběh pilotního výzkumu.....	52
6.2.1	Noniové měření zrakové ostrosti.....	52
6.2.2	Multisenzorická stimulace.....	53
6.3	Analýza dat.....	55
6.4	Výsledky.....	55
6.5	Diskuze.....	58
	Závěr.....	60
	Literatura.....	61

Úvod

Diplomová práce se věnuje vlivu multisenzorických asociací na efektivitu pleoptické stimulace. Multisenzorická asociace vzniká sloučením jevů z více senzorických modalit. Zvláštní pozornost bude věnována především zrakové a sluchové modalitě, které pokrývají velkou část našeho smyslového vnímání. Řada zrakových cvičení se soustředí pouze na danou modalitu, avšak v běžném životě jsou jednotlivé senzorické modality navzájem provázány a jejich oddělení při tréninku nastavuje nepřirozené podmínky, které mohou omezit jeho žádoucí dopady.

Motivací pro zvolení tohoto tématu byla možnost pomoci amblyopickým dětským pacientům upraveným cvičením, které přinese změnu do rutinní pleoptické terapie a jež by se jednou mohlo zapojit do léčby natrvalo. A také snaha podnítit zájem o výzkum v oblasti multisenzorických cvičení.

Cílem teoretické části práce je shrnout problematiku multisenzorické integrace zejména zrakových a sluchových informací s ohledem na její efektivitu při cvičení a následně prakticky ověřit účinek inovativního multisenzorického (zrakově-sluchového) podnětu při léčbě amblyopie.

Teoretická část nejprve stručně shrne amblyopii jako takovou a její neurální mechanismy, stávající terapii i nové přístupy léčby. Dále se práce zabývá pozorností, motivací, emocemi a jejich vlivem na senzorické zpracování, jenž je následně samostatně rozvedeno. Těžištěm teoretické části je multisenzorická integrace a její vztahy k neuroplasticitě a z ní vycházejícího multisenzorického učení. Problematika je silně protkána příklady tréninků a školení, u kterých bylo zapojeno více modalit, a jejich efektu na mozkové struktury a výsledky terapie.

V experimentální části je řešena efektivita inovovaného pleoptického cvičení obohaceného o zapojení dalšího smyslu, a to ve formě nově vytvořeného multisenzorického stimulu. Cílem experimentu je na skupině pleopticky cvičících amblyopů zjistit, zda má daný stimul dopad na zrakovou ostrost amblyopického oka a zda je rozdíl v účinku dvou typů použité doprovodné audiostimulace (tzv. kongruentní a inkongruentní). Sledován bude také dopad těchto typů stimulace na pozornost a emoce.

1 Amblyopie

Jedná se o sníženou zrakovou ostrost při optimální korekci, která nemá zřejmý patologický důvod. Amblyopie neboli tupozrakost je přítomna při normálním anatomickém nálezu a může jít o unilaterální nebo bilaterální formu. Dělíme ji podle příčiny vzniku, zrakové ostrosti a období vpádu patogenní příčiny. Podle příčiny vzniku je amblyopie rozlišována na dva typy, a to organickou a funkční. [1, 2]

Organická vzniká kvůli patologické nebo anatomické abnormalitě sítnice, nebo až hlouběji ve zrakové dráze. I když je příčina odstraněna, či sama odezní, amblyopie zůstává přítomna a nelze ji vyléčit.

Funkční typ amblyopie nemá žádnou organickou příčinu, či poškození. Většinou se objevuje jako unilaterální a lze ji léčit. Funkční typ se dále klasifikuje na amblyopii při strabismu, refrakční, hysterickou a ex anopsia.[1]

Amblyopie při strabismu je nejčastěji se vyskytující typ amblyopie, vzniká jako důsledek šilhání. Oko je uchýlené, a tedy není používáno k vidění načež dochází k útlumu fovey. Když tento stav trvá dlouho vzniká amblyopie. U amblyopie jsou charakteristickými znaky snížená zraková ostrost (centrální), vada rozlišovací schopnosti, různé typy fixace (centrální, excentrická, bloudivá) a vada lokalizace. [1, 2]

Refrakční amblyopie vzniká kvůli nekorigované sférické či cylindrické refrakční vadě (ametropická či meridionální amblyopie) na jednom nebo na obou očích. Neobvyklým typem refrakční amblyopie je izoametropická amblyopie, kdy nastává přibližně stejná velmi vysoká refrakční vada na obou očích a dochází k rozsáhlému snížení zrakových funkcí. Kritické hodnoty korekce jsou pro astigmatismus $> 2,50D$, pro hypermetropii $> 5,00D$ a pro myopii $> 8,00D$. K refrakční amblyopii se řadí také anizometropická amblyopie, kdy je nekorigovaný velký dioptrický rozdíl mezi pravým a levým okem, zejména při hypermetropii. Kritické hodnoty dioptrického rozdílu jsou $> 1,50D$ u astigmatismu, $> 1,00D$ u hypermetropie a $> 3,00D$ u myopie.

Hysterická amblyopie má neurotickou či psychotickou etiologii, její důvody jsou však blíže neurčité. [1]

Amblyopie ex anopsia vzniká z nepoužívání oka v postnatálním věku, kdy bylo zamezeno vstupu normálních vizuálních podnětů do oka. Například při kataraktě a dalších onemocnění, kdy dochází k zakalení optických prostředí. Nebo při okluzní amblyopii, kdy byl přítomen dlouhodobý ob vaz jednoho oka. [1, 2]

Podle snížení zrakové ostrosti je amblyopie rozdělována na těžkou, kdy je vízus horší než 0,1 ($< 6/60$), střední, kdy je vízus mezi 0,1 až 0,3 ($6/60 < V < 6/18$) a lehkou, kdy je vízus mezi 0,3 až 0,8 ($6/18 < V < 6/8$).

Amblyopii podle období vpádu patogenní příčiny dělíme na kongenitální (při narození nebo těsně po), d'arrêt (v období do 4 let vývoje, nebo ze zástavy vývoje) a d'extenction (po ukončení vývoje neboli po 4. roce). [1]

Vyšetření při podezření na amblyopii

Pokud je po subjektivní refrakci stále snížený vízus, používá se monokulárně stenopeická clona. Jestliže dojde ke zlepšení, jedná se o nedokorigovanou refrakční vadu, pokud pacient přečte téměř stejný řádek s žádným zlepšením, jde o amblyopii.

Dále je možné, že pacientovi se budou lépe číst krajní znaky anebo samostatné znaky, což je tzv. crowding fenomén – vada rozlišovací schopnosti, která se často objevuje právě u amblyopie, jak již bylo zmíněno výše. [1]

1.1 Pleoptika

V současné době zahrnuje léčba tupozrakosti především tři kroky: odstranit jakoukoli překážku zrakové osy, korigovat významnou refrakční vadu a vyvolat aktivitu tupozrakého oka omezením použití oka s lepším vízem [23, 24]. Pleoptika se zabývá léčbou amblyopie a využívá několik možných terapeutických přístupů, jako je léčba podáváním kapek, okluzí nebo pleoptickými cvičeními [2].

1.1.1 Atropinové kapky

Oko s lepším vízem je znevýhodněno podáváním atropinu, jehož následkem je zhoršené vidění způsobené obrnou akomodace. Kvůli dilatované zornici se zvětší sférická i chromatická vada a citlivost na oslnění. Léčba atropinem má 50 % úspěšnost. Úspěchu se netěší u amblyopie těžkého typu. Pokud nebude stačit k dosažení střídatého šilhání atropin, přechází se k použití okluze. [2]

1.1.2 Okluzní terapie

George L. de Buffon zavedl v roce 1743 amblyopickou terapii okluzí oka s lepší zrakovou ostroší a brýlové korekce pro oko se sníženou zrakovou ostroší. Tato terapie přetrvává dodnes jako suverénní léčba amblyopie. [2, 4]

Terapeutickým podnícením zde nastává účelná převaha celistvého obrazového signálu z tupozrakého oka, které je tak léčeno [13]. Okluze zlepšuje zrakovou ostrost

a zmenšuje útlum amblyopického oka. Jelikož je zabráněno binokulárnímu vidění, tak je tato metoda i preventivní zamezení vzniku anomální retinální korespondence (ARK).

Okluze má různé formy. První formou je okluze přímá, kdy je vedoucí oko zakryto. Druhou formou je okluze nepřímá neboli inverzní, kdy je okludováno tupozraké oko. Podle dalšího rozdělení dělíme okluzi na totální, částečnou (parciální) a sektorovou.

Totální okluze plně zamezuje vidění vedoucího oka (např. okluzorem viz Obr. 1). Parciální má za úkol pouze zhoršit vidění pod vidění oka amblyopického (např. mřížkováním skla, nebo atropinovou léčbou kapkami), řadí se sem optická penalizace. Sektorová okluzní léčba plně vyřazuje vidění určitou částí brýlového skla. [2]



Obr. 1 Druhy okluzorů – náplast'ové, gumové a látkové.

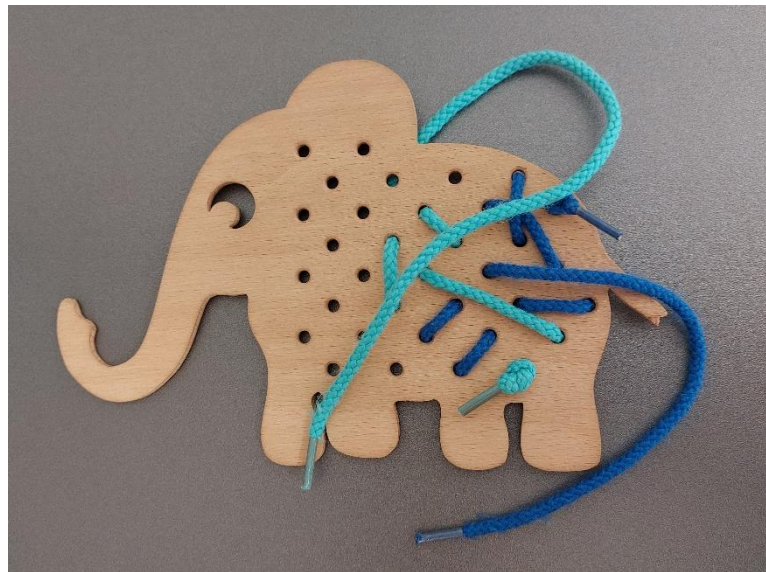
1.1.3 Pleoptická cvičení

Okluzní terapii je možné kombinovat s cvičeními aktivní a pasivní pleoptiky.

Aktivní pleoptická terapie

Amblyopické oko cvičí tím, že provádí aktivitu do blízka a využívá u toho dalších smyslových modalit. Tato léčba se využívá hlavně u předškolních dětí a je nezávislá na fixaci. Dětský pacient může tato cvičení vykonávat i doma po důkladné instruktaži rodičů a také na cvičeních v ortopticko-pleoptických cvičebnách. Cvičení by mělo mít okolo 30 minut, kvůli udržení pozornosti dítěte a také by mělo obsahovat více různých aktivit.

K běžným aktivním pleoptickým cvičením řadíme vyšívání tkaničkou do dřevěné předlohy (viz Obr. 2), obkreslování obrázků, navlékání korálků, stavění lega a mozaiek, vystřihování obrázků a další. Dále můžeme využít i společenské hry jako například dámu, domino a tak dále. K aktivním cvičením se zařazují i Starkiewiczova lokalizační cvičení, založená na spojení oko-ruka a oko-noha, především jde o míčové hry (basketbal, stolní tenis, fotbal a další), chůzi po čáře, házení kroužků na tyčku atd. Jednoduché přístroje využívané v aktivní pleoptice jsou lokalizátor, korektor a mnemoskop, jež jsou blíže rozepsané v publikaci [2].



Obr. 2 Vyšívání tkaničkou do dřevěné předlohy slona.

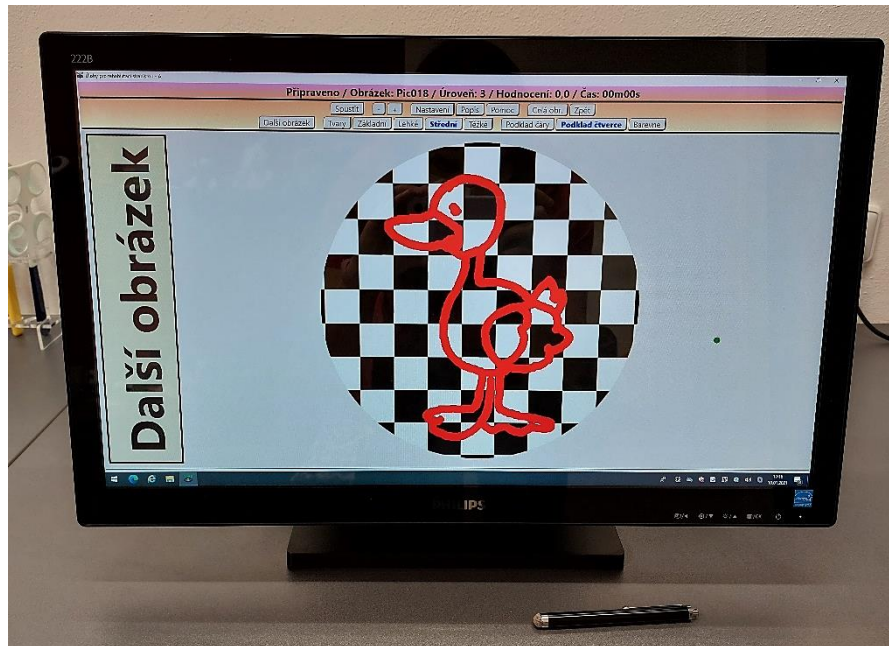
Pasivní pleoptická terapie

Pasivní pleoptická terapie převládá hlavně pro amblyopie s excentrickou fixací (EF). Technika tréninku zahrnuje pouze pasivní sledování vhodného stimulu. Pro tento typ tréninku se využívá vhodných pomůcek (prizmat, červeného filtru) a přístrojů jako jsou Bangerterův pleoptofor, centrofor, Cüppersův euthyskop, Cüppersův stolní koordinátor a Campbellův zrakový simulátor (CAM). K nejpoužívanějším metodám pasivní pleoptiky se řadí právě CAM stimulátor, jehož multisenzorická modifikace byla předmětem experimentální části této práce. Proto je tento typ stimulatoru rozepsán podrobněji. [2]

Metoda CAM

Léčba metodou CAM byla navržena F.W. Campbellem roku 1978, jež propagoval okluzi oka s lepším vizeem jen na 7 minut týdně, při kterých pacient sleduje rotující terče Campbellova zrakového simulátoru amblyopickým okem. Terče jsou pokryty vysoce

kontrastní pruhy o prostorových frekvencích 0,5-32 cyklů na stupeň (c°), které byly později změněny na šachovnice, jež znásobily stimulaci. Jedná se o 7 terčů, každý terč je sledován 1 minutu, za kterou se otočí o 360° . Na povrchu přístroje nad rotujícími terči se nachází plexisklo, na které může pacient kreslit smazatelným fixem při sledování terče, což podporuje udržení fixace. Na Obr. 3 je vyobrazena jeho digitalizovaná podoba s již navrženými liniemi na obtahování speciální tužkou. [2, 7, 13]



Obr. 3 Digitální verze CAM simulátoru.

Terapií na CAMu je pozitivně ovlivněna i kontrastní citlivost výrazněji a trvaleji než zraková ostrost. Cvičení je vhodné pro amblyopické pacienty s centrální i excentrickou fixací, nezávisle na věku dětského pacienta. Vyhovující i pro starší děti, které již nereagují na klasickou okluzi. Amblyopie s centrální fixací a anizotropická amblyopie má lepší výsledky terapie než ta s EF. Okluzie pro vedoucí oko byla později doporučena celodenně nejen při cvičení na 7 minut 1x za týden. Po ukončení léčby se může zraková ostrost opět zhoršit, proto je doporučeno cvičení na CAMu v rozmezí několika měsíců zopakovat. Léčba na CAM simulátor stále setrvává jako velmi důležitá a významná pleoptická metoda u níž nebyly uveřejněny žádné nežádoucí účinky. [2, 7]

Bylo zjištěno, že podélný kontrastní podnět (světlý nebo tmavý pruh – zde využití Gaborova obrazce) má vliv na neurony primární zrakové kůry (V1), musí však mít určitou orientaci, směr a rychlost rotace. Konkrétně se jedná o působení na (izo)orientační sloupce neboli přesněji tzv. větrníky viz dále v podkapitole 3.1.1 v části o vnímání tvaru pozorovaného objektu. Cvičení na CAMu podněcuje neuroplasticitu pomocí percepčního

učení (PÚ), jež se bere jako trvalé a konzistentní zdokonalování smyslové schopnosti, jejíž podstatou je opakovaná činnost (stimulace) a zkušenost. [2, 7, 13].

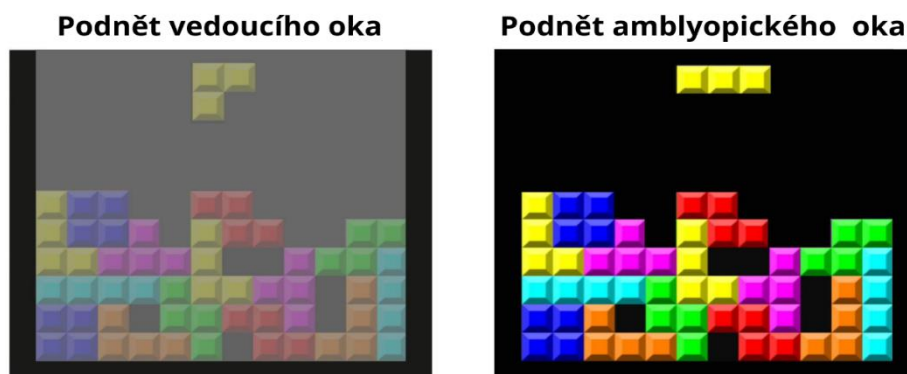
1.1.4 Nová pleoptická cvičení a přístupy

Do léčby amblyopie bývá v poslední době nejčastěji zařazováno hraní videoher, dichoptický trénink (binokulární), ale také byly zkoumány i přístupy transkraniální magnetické stimulace (TMS) a farmakologických aplikací. [40]

Jedním z inovativních přístupů je např. modifikace CAM simulátoru podle B. Varadyové [12] tzv. metoda barevné šachovnicové reverzační stimulace (BRS), kde je rotující šachovnicový terč nahrazen červeno-zelenou pulzující šachovnicí s fixační značkou uprostřed.

Další inovativní přístupy využívají binokulární spolupráci očí a moderní zobrazovací technologie. Jedná se např. o videohry, které vyžadují zapojení obou očí. V případě akčních videoher se předpokládá, že vidění je zlepšeno zapojením mechanismů pozornosti [25-26]. Ve studii Eastgate a spol. [27] vyvinuli systém zobrazení virtuální reality, na kterém se hrají interaktivní hry prostřednictvím stereo zobrazení s různými prvky „scény“ viditelnými dvěma očima (při stejném kontrastu).

Naproti tomu Hess a jeho kolegové [30] vycházejí z předpokladu, že nedostatečné zotavení z amblyopie je způsobeno interokulární supresí, která je silnější při přechodu od vedoucího oka k amblyopickému oku než naopak. Vyvinuli obměněnou verzi videohry Tetris viz Obr. 4, na kterou lze prohlížet dichopticky, přičemž bloky viditelné okem s lepším vizelem se zobrazují s nižším kontrastem než bloky viditelné amblyopickým okem. Tak, že se oběma očím jeví stejně. Po hraní hry 1 hodinu každý den po dobu 2 týdnů subjekty vykazovaly signifikantně větší zlepšení zrakové ostrosti a stereopse, když byl trénink dichoptický, spíše než s použitím pouze amblyopického oka [29-31]. [20]



Obr. 4 Upravená verze videohry Tetris pro terapii amblyopie. [30]

1.2 Neurální mechanismy amblyopie

Amblyopie je neurální porucha, která je výsledkem abnormální stimulace mozku během kritických období vývoje zraku. Neboli je efektem nedostatku běžné neuroplasticity. Aby bylo možné navrhnout lepší léčebné strategie, je nezbytné porozumět jejím nervovým mechanismům. [5, 33]

Jednotlivé podtypy amblyopie jsou spojeny s charakteristickými vzorci ztráty ostrosti a kontrastní citlivosti. Bylo zjištěno, že amblyopie při strabismu je spojena se střední ztrátou ostrosti a lepší než normální kontrastní citlivostí při nízkých prostorových frekvencích. Anizometropická amblyopie je spojena se středně těžkou ztrátou ostrosti a kontrastní citlivost horší, než je norma. Smíšený typ amblyopie je spojen s velmi špatnou zrakovou ostroší a normální nebo subnormální (nižší) kontrastní citlivostí. Stav reziduální binokulární funkce je také hlavním faktorem zrakových deficitů. Lidé bez zbytkové binokulární funkce mívají horší ostrost, ale lepší kontrastní citlivost, zatímco ti se zbytkovou binokulární funkcí mívají lepší ostrost, ale horší kontrastní citlivost. [6]

1.2.1 Narušení mozkových struktur vlivem amblyopie

Na první pohled se zdá, že tupozrakost vede k jemné nervové dysfunkci, která ale při bližším zkoumání má dalekosáhlé následky. Mnoho pacientů s tupozrakostí má nadále abnormální vidění po celý život. Aby bylo možné navrhnout účinné terapeutické strategie pro prevenci a léčbu této poruchy, musíme nejprve pochopit, jak raná anomální vizuální zkušenost narušuje vývoj mozku.

Na základě dostupných neuroanatomických, neurofyzilogických, elektrofyziologických, psychofyzikálních a neurozobrazovacích poznatků je nyní jasné, že neurální deficity u amblyopie mají několik klíčových charakteristik: abnormální prostorové a časové zpracování, deficity ve ventrálním i dorzálním proudu zpracování, abnormální aktivity ve V1, extrastriálních a později specializovaných kortikálních oblastech, nedostatky v místním (lokálním) a globálním zpracování, abnormální integrace vizuálních informací v prostoru a čase, abnormální oddělení signálů od šumu a abnormální interokulární suprese.

Kromě toho je nyní známo, že vyšší mozkové funkce spoléhají na jemnou rovnováhu mezi místní specializací a globální integrací mozkových procesů. Nahlížení na mozek jako na komplexní síť vzájemně se ovlivňujících subsystémů vedlo k posunu

od hledání lokálně aktivovaných oblastí k identifikaci funkčních sítí souvisejících s úkoly.

Zkoumání pomocí nových neurovizuálních a analytických technik bude klíčem k pochopení, jak amblyopie ovlivňuje časoprostorovou koordinaci v celé kortikální vizuální síti. Také znalosti plasticity mozku a činitelů, které řídí začátek a konec kritických období, povedou k novým terapeutickým přístupům. Využívání poznatků neuroplasticity (např. percepční učení (PÚ)) může uskutečnit větší obnovu zrakových funkcí i po skončení kritického období. [5, 33]

1.2.2 Zraková neuroplasticita a její klinické důsledky v léčbě amblyopie

Pojem plasticita označuje dynamickou schopnost mozku funkčně a strukturně reorganizovat svá spojení v reakci na změny prostředí. S věkem se mění její hladina, po skončení tzv. kritických období (okolo 7 let) plasticita sice klesá, avšak v určité míře je zachována až do dospělosti [5, 51, 52]. Zrakovou neuroplasticitu lze ovlivnit stimulací farmaky nebo zrakovým tréninkem založeným na percepčním učení [32, 54-58]. Pozornost je nepostradatelným faktorem při terapii a často má větší vliv než pacientův věk [53].

K projevům vizuální plasticity je řazeno percepční učení, adaptace a pozornost. Percepční učení je založeno na repetitivním provádění úkolu a také je behaviorální znakem zrakové neuroplasticity. Pozornost se s percepčním učением vzájemně ovlivňují, adaptace se dělí na dlouhodobou a krátkodobou a může zahrnovat jisté formy učení. Percepční učení, které je využíváno také k podnícení neuroplasticity v případě tréninku na CAM stimulatoru, jehož obměnu používáme v našem experimentu, bude blíže rozebráno. [13, 32]

Percepční učení (PÚ)

Percepční učení zahrnuje intenzivní, aktivní, řízenou vizuální zkušenost se zpětnou vazbou, a proto mohou být jeho účinky větší než pouhé spoléhání se na každodenní vizuální zkušenosti během okluze [5]. Jeho efekt byl potvrzen i po ukončení kritického období [63-68]. Tato zlepšení se ukázala jako nediferenciovaná na jeden úkol, takže mohou být zobecňována na nové úkoly a podněty, což zvyšuje atraktivitu percepčního učení pro nové možnosti terapie [69-75]. Pilotní studie [70, 77, 78] na dospělých amblyopech ukazují na zlepšení zrakové ostrosti, stereopse a lokalizaci v prostoru při hraní akčních videoher. Tyto účinky PÚ jsou ve většině případů dlouhodobé.

Nervové mechanismy PÚ mají zatím spoustu neznámých, avšak předpokládá se, že fungují prostřednictvím snížení vnitřního šumu ve vizuálním systému nebo prostřednictvím zlepšené účinnosti při získávání stimulačních informací změnou relativní váhy informací [79-82]. Plastické změny vyvolané ve vizuálním systému ukazují zacílení na oblast primární zrakové kůry (V1) [83].

V současné době, ať už se percepční učení vyskytuje na nižší úrovni (např. V1) nebo na vyšší „rozhodovací fázi“ vizuálního zpracování, nebo obojí např. prostřednictvím zpětné vazby, zlepšené laterální interakce, nebo jako nízkourovňový proces, ale pod kontrolou zpracování shora dolů, zůstává otevřenou otázkou. [72, 84, 85]. [5]

2 Elementární mentální procesy

Komplexní duševní činnost je rozdělena na řadu na sebe navazujících procesů. Jedná se o procesy poznávací, emoční, motivační a proces chování. Kognitivními (poznávacími) procesy jsou získávány informace o vnějším okolí, ale i o vnitřních pochodech našeho organismu. Poznání je výběrovým procesem, pokud se jedná v určité chvíli o nepodstatnou informaci, tak bude v procesu zpracování odfiltrována. Zaměření kognice na daný stimul ať už vnějšího nebo vnitřního prostředí v určité chvíli nazýváme pozorností. Procesy poznávání jsou rozděleny na dva jednotlivé pochody, jimiž jsou vnímání a myšlení.

Vnímání je v pořadí první, jelikož se nachází na nižší úrovni poznávacího procesu, protože díky němu jsme schopni určit jen jevovou část okolního nebo vnitřního světa nahlíženou objektivně. Vnímání má za úkol vyhodnotit detekci senzoričského stimulu. Avšak smysly registrovaná realita se ihned neztrácí z vědomí, i když už není v okolí, ale je uložena do paměti na různě dlouhý časový úsek.

Druhým pochodem na vyšší úrovni poznávacího procesu je myšlení. Myšlení umožňuje proniknout k základnímu principu objektivní reality. Člověk je schopen i abstraktního myšlení, což je stav, kdy se myšlenkové operace neprovádí jenom s výjevy reálných věcí ve vědomí, ale i například prostřednictvím řeči. Výjevy reálných předmětů jsou nahrazovány abstraktními slovními symboly. S nimiž potom člověk ve své mysli manipuluje. Stejně jako reálný obraz mají tyto slova a představy kód, pomocí něj vyvolávají reakci příslušných neuronů. Při procesu myšlení jsou smyslové informace rozdělovány podle své funkce, porovnány s minulými informacemi z paměti a podle toho i uloženy.

Emoce (city) jsou jistý subjektivní vztah k podnětu, který je zaujímán jedincem. City jsou nenahraditelnou součástí všech senzoričských informací. Emoční postoje mohou být kladné, neutrální nebo záporné a s tímto pocitem je pak spojen i příjem informace.

Motivační proces je psychický mechanismus, jež nabádá jedince k vykonání určitého vzorce chování. Motivační proces může být podněcen přijetím senzoričské informace.

Procesem chování je myšlená zevní aktivita organismu. Nejprve je sestaven vhodný plán a později detailní program určité motorické činnosti. Uskutečnění pak provádí funkční oblasti somatosezoričského systému, za pomoci visceromotorického systému, který zajišťuje změnu vnitřního prostředí. Učení je získanou formou chování.

Lze jej formulovat jako mechanismus centrálních nervů, jež zajišťuje odpověď na vlivy okolí chováním jedince. Podle prováděných experimentů se učení dělí na neasociativní a asociativní. [18]

Problematika následujících podkapitol popisuje procesy, které mají určitým způsobem vliv na zrakové a sluchové vnímání neboli ovlivňují probandy při multisenzorické stimulaci.

2.1 Pozornost

Pozornost může být chápána jako informační filtr, který brání přeplnění informačního systému. Díky ní je možná správná analýza vnímaných podnětů. Předpokládá se, že funkční mechanismy zaměřující pozornost k danému smyslu, nejspíše obsahují (odstředivé) spoje z korových oblastí smyslových modalit k nižším centřům, což může s velkou pravděpodobností určovat hladinu sensorického signálu, jež roste od receptorů do korových oblastí. Příkladem může být sluchová kůra, která je schopná inhibovat nebo excitovat signál přicházející z hlemýždě. [18]

Pozornost bývá řazena mezi vyšší funkce polymodálního asociačního kortexu [14,15,48]. Bylo potvrzeno, že je jednodušší dělit pozornost mezi smyslové modalitty než přijímat více informací jednou sensorickou modalitou. [42]

2.1.1 Vizuální pozornost

Při výzkumu pozornosti bylo nejvíce informací nabyto ze studia neuronálních mechanismů, jež zaměřují vizuální pozornost. Jedná se o zacílení pozornosti na určitý podnět v zorném poli (tzv. selektivní pozornost), aby se zobrazil do fovey centralis. Je známo, že i v případě tohoto zaměření, není nutností, aby byl pohled pozorný, může jít o bezmyšlenkovité zahledění. Nejlepší možné zpracování sensorických dat potřebuje rychle uvolnit pozornost z minulého podnětu a přesměrovat ji na další. [18, 43]

Z výzkumu na zvířecích modelech byly vymezeny tři oblasti mozku, kde sídlí vizuální pozornost, jsou to lobulus parietalis inferior (zadní část parietální oblasti kůry), laterální pulvinar thalami a colluculi superiores. Poškození těchto oblastí má různé dopady, může jít o neschopnost vymanit pozornost z předchozího místa zájmu, zaměřit pozornost, nebo zpomalit mechanismy přesměrování. [18]

Aktivní pozornost upravuje odezvu oblasti V1 na určitý stimul. Ukazuje se, že pozornost má na úspěch terapie větší vliv než věk pacienta, právě kvůli této své schopnosti modulovat odezvu. [53]

Vědomým zacílením pozornosti lze působit na zrakovou percepci. Některé vizuální podněty ovlivňují pozornost více než jiné, jde například o nesouvislé promítání podnětu, vědomé zaměření na jakýkoli detail vizuálního podnětu nebo podnět, který se relativně pohybuje ke sledujícímu (tzv. dilatace). Pozornost působí antisupresivně. [14, 15]

Vizuální pozornost je přitahována výraznými podněty, které „vyskakují“ (pop out) ze svého okolí. Může také být dobrovolně nasměrována k objektům aktuálního významu pro pozorovatele. Výrazné podněty a subjektivní zaujetí pozorovatele se vzájemně ovlivňují a obvykle je pozornost věnována jednotlivým věcem postupně. Celý tento proces závisí na dvou typech mechanismu pozornosti. [36]

Bottom-up mechanismus (zdola nahoru)

Předpokládá se, že mechanismy zdola nahoru fungují na základě syrového smyslového vstupu a rychle a nedobrovolně přesouvají pozornost k výrazným vizuálním rysům potenciální důležitosti – červené skvrně proti zelenému poli nebo náhlému pohybu. Informace o zrakovém podnětu jsou zpracovány tak, jak byly přijaty. [36, 44]

Top-down mechanismus (shora dolů)

Mechanismy shora dolů implementují naše dlouhodobé kognitivní strategie (očekávání a znalosti), směřují pozornost k barevným skvrnám, pokud máme hlad, nebo k náhlým pohybům a čtyřnohým tvarům, pokud se bychom se zrovna báli predátora [36]. Mechanismus zpětné vazby nám zprostředkovává úmyslné zacílení pozornosti. Zpětná vazba asociační kůry ovlivňuje činnost primární zrakové kůry (V1). Neurony V1 jsou senzitivní i na globální vlastnosti vnímané scény. Princip „FOREST BEFORE TREES“ popisuje postupné zpracování obrazu od obecné scény ke konkrétním detailům a bude blíže rozebrán v kapitole 3.1.2. [14, 15, 35-37]

Psychologové zkoumali, jak tyto dva procesy pozornosti fungují v lidském vnímání, a to jak jednotlivě, tak jak je tomu za přírodních podmínek obvyklé společně [86]. Pozornost zdola nahoru nás tedy upozorňuje na významné položky v našem prostředí, ale pozornost shora dolů moduluje signály zdola nahoru, když potřebujeme hledat něco konkrétního.

Článek Ogawy a Komatsu [87] poskytuje pohled na nervové procesy, které jsou základem takových interakcí mezi pozorností zdola nahoru a shora dolů na zvířecích modelech. Zatímco opice prováděla zadané úkoly, kdy musela cílit svoji pozornost,

porovnávat barvy a tvary. Ogawa a Komatsu zaznamenali aktivitu elektrických peaků v jednotlivých neuronech ve V4 (v oblasti sekundární zrakové kůry), mezistupně v cestě zpracování zrakových objektů v mozku, kde je známo, že nervová aktivita je ovlivněna pozorností [88-92]. Jiné neurony vykazovaly podobná zlepšení odezvy pro jednobarevné podněty a podněty určitého tvaru, nebo obojí, opět při obou mechanismech.

Na neurální i psychofyzické úrovni tedy pozornost zdola nahoru působí dříve a pozornost shora dolů se zpožděním a trvá řádově 100 milisekund. Tyto paralelní časové průběhy pomáhají potvrdit funkční vztah mezi neurálními událostmi a měřením behaviorálního výkonu. Dřívější časový průběh pro pozornost zdola nahoru dává smysl, jelikož vlivy nápadnosti založené na jednoduchých vizuálních vlastnostech by mohly být rychle implementovány v raných fázích vizuálního zpracování, zatímco kognitivní kontrola shora dolů by vyžadovala následné operace se smyslovým vstupem kůry vyšší úrovně. [36]

Ve studii Poole a spol. [47] bylo zjištěno, že potlačení vstupu z amblyopických očí v dětství narušuje pozorné zpracování. Předpokládáme sníženou konektivitu mezi monokulárně laděnými dolními zrakovými oblastmi a subkortikálními strukturami, které řídí foveální pozornost, a také frontálními oblastmi mozku odpovědnými za rozpoznávání písmen a pracovní paměť. Tato zjištění vyzdvihují roli podnícení pozornosti při amblyopických zrakových deficitech.

2.1.2 Sluchová pozornost

Sluchová pozornost umožňuje přesné a rychlé nasměrování ke zvukům, které vzbuzují zájem v akustické prostředí. Pozornost může být shora dolů (úmyslná, nebo závislá na úkolu) nebo zdola nahoru (založená na výraznosti zvuku).

Bottom-up mechanismus (zdola nahoru)

Pozornost „pop out“ zdola nahoru hraje důležitou roli při detekci akustické scény a selektivním rozřazování podstatných příchozích signálů [98].

Top-down mechanismus (shora dolů)

Na rozhraní vnímání a jednání vede pozornost shora dolů k lepšímu zpracování informací, citlivosti chování a zkrácení latence odezvy. Pozornost shora dolů je proces výběru, který soustředí zdroje kortikálního zpracování na nejrelevantnější sensorické informace, aby se udrželo chování zaměřené na cíl v přítomnosti více konkurenčních

rozptýlení a zahrnuje několik odlišných behaviorálních a nervových procesů fungujících na více úrovních [93-97].

Od průkopnické práce Hubela, Galambosa a spol. [99] je známo, že reakce neuronů ve sluchové kůře mohou být silně modulovány pozorností. Sluchová pozornost může být selektivně zaměřena na širokou škálu akustických vlastností včetně prostorového umístění, sluchové výšky, frekvence nebo intenzity, trvání tónu, zabarvení, směru nebo sklonu, řečových oproti neřečovým proudům a charakteristik jednotlivých hlasů. Vzhledem k rozmanitosti akustických dimenzí, kterým se můžeme věnovat, a bohatě propojeným sítím sluchového zpracování pravděpodobně existuje více nervových lokusů pro sluchovou pozornost. [100, 103]

Studie kortikální plasticity navozené sluchovou pozorností prokázaly jasnou modulaci neuronových odpovědí v primární sluchové kůře [101, 102]. Kromě sluchových korových oblastí existují korové asociační oblasti, jejichž činnost je ovlivněna sluchovou pozorností. Při sluchové pozornosti jsou aktivovány také asociační oblasti v supramodální frontoparietální pozornostní síti např. levý precentrální gyrus a pravý zadní parietální kortex [104-107]. [38]

2.1.3 Interakce mezi sluchovou a zrakovou pozorností

Existuje mnoho podobností mezi pozorností ve sluchové a vizuální modalitě, kde se z psychofyzických, behaviorálních a neurobiologických studií také vyvstal dvousložkový rámec pro výběr pozornosti (mechanismy shora dolů a zdola nahoru). Předpokládá se, že v obou paralelně fungují. Další zásadní podobností je, že pozornost může modulovat jak prostorové, tak neprostorové zpracování podnětů v obou modalitách. Navíc, kromě toho nyní přibývá neurozobrazovacích poznatků pro vizuální modulaci aktivity v mnoha sluchových kortikálních polích a stále více je potvrzováno, že celá kůra je multisenzorická, což bylo předznamenáno dřívějšími pracemi, jako je např. neurofyzilogická studie sluchových a zrakových odpovědí ve sluchové kůře opic vykonávajících modální úkol selektivní pozornosti [49, 109-110]. [38]

Pokud by mozek používal běžné, ale omezené zdroje pozornosti, pak by unimodální pozornost (věnující se pouze jedné relevantní smyslové modalitě) mohla vyžadovat potlačení reakcí na irelevantní smyslové vstupy.

Několik studií zkoumalo, zda odezvy ve sluchové kůře na akustický podnět jsou ovlivňovány jinými (řízenými či neřízenými) probíhajícími smyslovými událostmi. V souladu s modelem s omezenými zdroji je běžným zjištěním, že když je pozornost

odváděna od sluchové události přítomností vizuálního podnětu a zvláště tím, že se věnuje vizuálnímu úkolu ve srovnání se základní linií bez konkurenčního podnětu, pak sluchová kůra obecně vykazuje sníženou aktivitu v akustických podnětech, ale ne vždy [112-118]. Naopak mnoho z těchto studií také zjistilo, že pozornost na sluchové podněty zvyšuje aktivitu ve sluchové kůře. [95,117-119]

Analýza funkční konektivity mezi sluchovými a zrakovými kortikálními oblastmi ve zrakových a sluchových úlohách ukázala reciproční inverzní vztah, tedy zvýšení sluchové aktivity přímo korelovalo se snížením zrakové aktivity (a naopak). [120]

Ačkoli byly výše zmíněny studie, které zdůrazňovaly konkurenci mezi smyslovými kanály v modelu omezených zdrojů, v relativně jednoduchých kontextech úkolů na nízké úrovni (jako je diskriminace výšky zvuku nebo kontrastu) nemusí dojít ke konfliktu ohledně omezených zdrojů pozornosti, protože zjevně existuje dostatek samostatných zdrojů pozornosti pro zrak i sluch. [121]

Existují případy, kdy ke zpracování informací přispívají jak sluchové, tak vizuální vstupy. Takové kooperativní interakce vedou k multisenzorické integraci nebo k multisenzorické zesílené aktivitě v primární a sekundární sluchové kůře, jako je např. odezírání ze rtů, pozornost ke komplexním audiovizuálním kombinovaným stimulům, lokalizace zdroje pomocí bimodálních podnětů, nebo vizuální navádění při analýze sluchové scény [122-125, 128, 130-131]. Nervová reprezentace lidské chůze v časové oblasti biologického pohybu je dalším příkladem audiovizuální integrace na vyšší úrovni, ve které vizuální i sluchové vstupy (zvuk kroků) aktivují stejnou oblast [126].

Studie Hocherman a spol. [49] ukázala, že neuronální reakce ve sluchové kůře, během úkolu selektivní pozornosti, při kterém byly různé sluchové a zrakové podněty spojeny se stiskem páky se dvěma možnostmi volby, byly silnější, když byly zrakové a sluchové podněty v kongruenci a byly sníženy, když šlo o rozporuplné bimodální informace [49].

Fyziologická studie Selezneva a spol. [132] prokázala zvýšenou aktivitu v sluchových kortikálních neuronech opic na zrakové vstupy související s úkolem, ale pouze v kontextu úkolu se sluchovým chováním, což ukazuje na pozornostní výběr relevantního vizuálního vstupu do sluchové kůry.

Neurozobrazovací studie zkoumající společné nervové obvody, které jsou základem kontroly zrakové i sluchové pozornosti, odhalily do značné míry překrývající se frontoparietální síť [133]. V závislosti na úkolu může docházet k segregaci efektů

pozornosti podél dorzo-ventrálních cest, jak navrhuje dokument MEG/fMRI [94], který poskytuje další důkazy o přítomnosti účinků duální selektivní pozornosti na lokalizaci a identifikaci zvuku. [38]

2.2 Emoce a motivace

Za morfologický základ pro emoce a motivace je považován limbický systém, konkrétně hipokampální formace a jaderný komplex amygdaly. Limbický systém je hustě propojen s podkorovými a korovými oblastmi. A v podstatě hraje reciproční přechodové pásmo mezi strukturami diencefala a asociačními korovými oblastmi.

2.2.1 Emoce

City jsou brány jako prožívání vlastních vnitřních vztahů k informacím přicházejících ze smyslových modalit. Emoce definuje psychické i fyzické hledisko. Psychická stránka se skládá z následujících složek: afektivní (subjektivní emoční zážitek = slyšet výbuch bomby), kognitivní (uvědomění si dané emoce = strach) a konativní (určitá reakce, vzorec chování = nutnost se chránit, hledat úkryt). Fyzikální hledisko obsahuje změny aktivit kosterního svalstva a útroby. Například zrychlení dýchání, zvýšení krevního tlaku a další, má nejspíše jedince připravit k uskutečnění určitého vzorce chování. Emoce jsou schopny velmi silně modulovat zrakové vnímání. Pokud se jedná o nepříjemné pocity, pak mají antisupresní efekt. [14-15, 18]

Interakce emočních sluchových a vizuálních zpracování

V každodenním životě více smyslových kanálů společně spouští emocionální zážitky a jeden kanál může změnit zpracování jiného kanálu. Například když je pozorován emocionální výraz obličeje a slyšen emocionální tón hlasu, společně se vytvoří emocionální zážitek. Interakce vizuálních a sluchových emocionálních informací však nejsou omezeny jen na sociální komunikaci, ale mohou se rozšířit do mnohem širších kontextů, včetně lidských, zvířecích a environmentálních podnětů. Je požadován širší pohled na multisenzorické interakce při zpracování emocí. [59]

Obecně je emocionální zpracování zvuku a obrazu velmi srovnatelné. Vzorec behaviorálních, fyziologických a elektrofyziologických reakcí vyvolaných emocionálními zvuky je srovnatelný s emocionálními obrazy [134-136]. Existují však určité důkazy, že reakce na emocionální zvuky jsou slabší a objevují se později [134, 137]. Na neuronální úrovni získávají emocionální zvuky i obrázky privilegovaný přístup ke zdrojům zpracování v mozku. [59]

Jak bylo zmíněno výše, předpokládá se, že audio-vizuální interakce jsou možné v obou směrech. Emocionální vizuální i sluchové informace jsou přednostně a intenzivně zpracovávány. Lze tedy očekávat, že audiovizuální interakce emočních podnětů nastanou ještě silněji, pokud jsou přenášeny oběma modalitami.

Ze studie Cox a spol. [138] vyplývá, že kongruence zvyšuje emoční reakce sluchového vnímání, ale pouze u děsivých nebo smutných zvuků s odpovídajícími obrazy (např. zvuk pláče v kombinaci s obrázkem plačícího dítěte) v porovnání se zvuky, které nesouvisely s obrazy.

Ve studii [139] nenašli žádné důkazy pro rozdíly v indukci emocí mezi vizuálními a sluchovými podněty, ani nepotvrdili, že bimodální stimuly jsou účinnější než unimodální stimuly. To ale mohlo být částečně způsobeno tím, že bimodální stimuly nebyly optimálně kongruentní.

Prokázalo se, že audiovizuální dvojice s příjemnými zvuky a obrázky byly hodnoceny jako příjemnější než pouze příjemné obrázky. Valenčně kongruentní audiovizuální kombinace byly navíc hodnoceny stejně emotivně jako jiné nekongruentní kombinace [140].

Emocionální zvuky mohou nespecificky zvyšovat smyslovou citlivost nebo selektivní pozornost ke všem přichozím vizuálním podnětům. A co je nejdůležitější, nepříjemné obrázky s příjemnými zvuky vyvolaly větší odezvu ve srovnání s nepříjemnými obrázky a nepříjemnými zvuky. Snížená odezva v reakci na shodné dvojice zvuk-obraz naznačuje, že zpracování nepříjemných obrazů je usnadněno (tj. je potřeba méně prostředků na zpracování), když jim předcházely shodné nepříjemné zvuky.

Výše uvedené studie naznačují, že zpracování emocí v jedné senzorní modalitě může silně ovlivnit zpracování emocí v jiné modalitě během velmi raných fází zpracování, stejně jako na úrovni valence a vzrušení. Avšak vliv kongruence nebyl plně prokázán, pokud nešlo o velmi smutné a hrozné podněty. [59]

2.2.2 Motivace

Chování je prakticky stále spojené se snahou ukojit danou potřebu. Pro vrozené potřeby a úsilí je uspokojovat vznikl termín biologická motivace, ta se dělí na instinkty a drivy. Instinkt je motivace, která spouští geneticky předurčený vzorec chování, jež není ovlivněn zkušeností. Drive má velmi podobnou definici až na závěrečnou část, kdy je program chování upravován podle zkušenost jedince.

Zrod drivů je spojen s vývojem neokortexu a superioritou nad limbickým systémem a dalšími fylogeneticky staršími částmi mozku. V mládí jsou tyto mechanismy řízení limbického systému ještě nevyzrálé. Čímž se dají interpretovat záchvaty zuřivosti u dětí. Za několik let se postupně utvoří kontrola neokortexu, to znamená dítě je naučeno novým vzorcům, jež mu pomohou se začleněním do společenského života.[18]

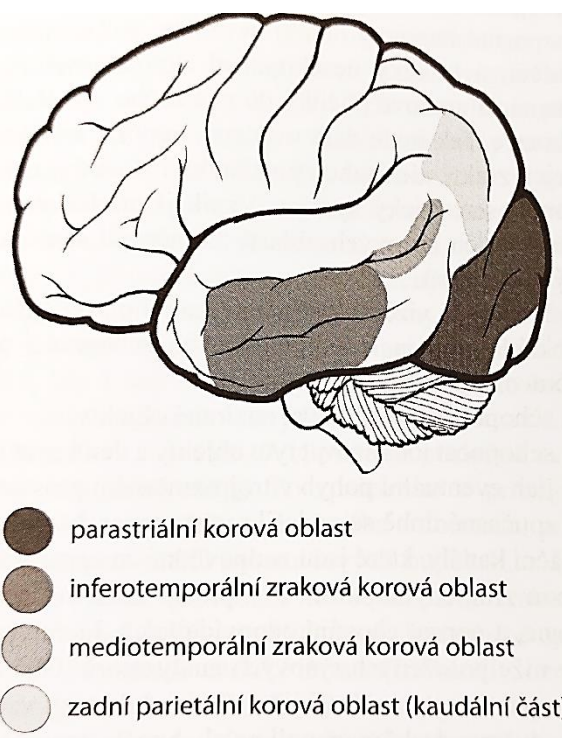
Motivace je podstatná pro vyvolání pozorného chování, které je potřeba ke stimulaci neuroplasticity v korových oblastech [60]. Tudíž je nezbytné, aby bylo cvičící dítě motivované, což může být problém, jelikož velmi malé děti nemají pro toto chování plně vyvinuté mozkové struktury, jak je zmíněno v předešlých odstavcích. [14-15, 18]

3 Vnímání

Vnímání je řazeno ke kognitivním procesům, jež choronologicky spadají pod elementární mentální procesy, avšak kvůli přehlednosti a rozsahu následující kapitoly, bylo zvoleno toto řazení. U zrakového vnímání je předpokládána znalost průběhu zpracování sensorických informací ze sítnice, zrakovou dráhou až po primární zrakovou kůru.

3.1 Zrakové vnímání

Z oblasti primární zrakové kůry V1 se vizuální informace šíří dále do sekundární zrakové korové oblasti V2 neboli zrakové asociační korové oblasti, jež se dělí na čtyři korová pole: parastriální korovou oblast, mediotemporální zrakovou korovou oblast, inferotemporální zrakovou korovou oblast a zadní parietální korovou oblast, viz Obr. 5. Při zjednodušení výkladu lze říci, že funkcí těchto regionů je spojování dílčích zrakových počítků (jež se vytváří ve V1) v jeden celistvý zrakový vjem (unimodální asociační korová oblast). Představu o této funkci si můžeme utvořit na základě informací



Obr. 5 Sekundární zrakové korové oblasti. [18]

získaných při elektrickém dráždění nebo poškozeních těchto oblastí (vznik tzv. agnózie). Při elektrické stimulaci primární zrakové kůry se utváří tzv. fosfény, neboli elementární počítky vnímané jako světelné záblesky. Přitom elektrické dráždění v sekundární zrakové kůře dává za vznik složitým zrakovým vjemům tzv. zrakovým pseudohalucinacím, kdy pacient popisoval zrakové vnímání určitých tváří, osob či zvířat. Avšak plně si uvědomoval, že tyto viděné bytosti nejsou skutečné.

3.1.1 Procesy zpracování vizuální informace

Většina informací z okolí je přijímána zrakem, je uváděno, že až 90 %. Tyto získané informace se skládají z řady základních vlastností pozorovaného objektu. Jako

jsou tvar objektu, jeho barva, poloha a pohyb v prostoru a ten může mít určitý směr a rychlost. Většina vědomostí o vizuálním zpracování byla dosažena zkoumáním receptivních polí neuronů dílčích úrovní zrakové dráhy a zrakové kůry.

V současnosti je již skoro objasněno, které centrální nervové mozkové struktury mohou za vnímání vizuálních informací, avšak stále zůstává otazníkem, jak se tato detekce uskutečňuje. Jedna z navrhovaných teorií staví na přítomnosti tzv. rysových analyzátorů (feature detectors) ve vizuálním systému. Předpokladem této teorie je, že různé vlastnosti zrakového sdělení jsou upravovány v oddělených vedle sebe jdoucích informačních kanálech (cestách). Každá cesta je sestavena ze sériově pospojovaných nervových buněk, jež pracují jako rysové analyzátoři. Funkcí těchto analyzátorů je zjišťovat určité rysy (detaily) v pozorovaném okolí. Každý ze základních rysů pozorované scény má svůj neuron, který přísluší k tomuto rysu a je schopný jeho detekce. Jako by tato schopnost reakce byla „naladěna“ jen na tento elementární vizuální podnět. Ucelený vjem pozorované scény je dán sjednocením aktivit všech v té chvíli podněcovaných rysových detektorů. Tato syntéza simplexních vizuálních vjemů ve vjem komplexní je zároveň procesem o určité hierarchii.

Nízko úroňové neurony neboli ty na začátku informačního kanálu mají za úkol detekovat jen velmi jednoduché rysy pozorované scény (např. světelné skvrny). Sloučením jejich elektrických aktivit se vytváří kód pro komplexnější rys okolní scenerie, čímž je myšlen třeba světelný pruh o jisté orientaci, či roh nějaké osvětlené plochy, který je zachycován dalším výše hierarchicky umístěným neuronem. V určitých „patrech“ se spojují dílčí podél sebe jdoucí informační cesty, jež zpracovávají odlišné kvality obrazu. Z čehož vyplývá, že v horní části této ucelené gnostické pyramidy by měly být postaveny neurony, jejichž schopnost reakce je „naladěna“ jen na jeden určitý celistvý objekt v pozorované scéně. Přítomnost těchto buněk s danými schopnostmi byla skutečně potvrzena. Například nervové buňky „grandmother’s cells“ reagující na spatření obličeje známého člověka se dají nalézt v interferotemporální zrakové korové oblasti.

Předpokladem pro bezchybné zrakové vnímání okolí je přítomnost dvou zásadních schopností zrakového zpracování informací. První z nich je rozpoznání sledovaných objektů a další je schopnost jejich lokalizace a detekce případného pohybu těchto objektů ve 3D prostoru. V současnosti jsou nalezeny dvě informační cesty, které zpracovávají obě ze zmíněných schopností složené vizuální informace a jsou schopny vysvětlit chování dříve zmíněných rysových analyzátorů, jež se nalézají níže v hierarchickém procesu.

Oba informační kanály mají svůj počátek na sítnici, kde se vztahují ke dvěma typům gangliových buněk pojmenovaných X a Y, proto jsou někdy označovány jako X-cesta a Y-cesta.

Ze všech gangliových buněk sítnice 80 % jsou X nervové buňky, umístěné v oblasti fovey. Kvůli anatomii těchto buněk mají malé receptivní pole a z jeho zkoumání se předpokládá, že podávají podrobnou analýzu struktury a barvy sledovaného objektu, a tedy jeho rozpoznání.

Nervové buňky Y mají pouze 10 % z celkového počtu gangliových buněk v sítnici, nejčtenější jsou na periférii sítnice. Mají však mnohem větší receptivní pole oproti X nervovým buňkám. Ze zkoumání Y buněk bylo vyvozeno, že jsou vztaženy k detekci lokace a pohybu sledovaného objektu v okolí.

Existuje ještě třetí cesta W, která má zbývajících 10 % gangliových buněk sítnice, kde většina jejich axonů vede do colliculi superiores. Přisuzuje se jim souvislost s reflexními pohyby očí a pohybem hlavy za objektem v prostoru.

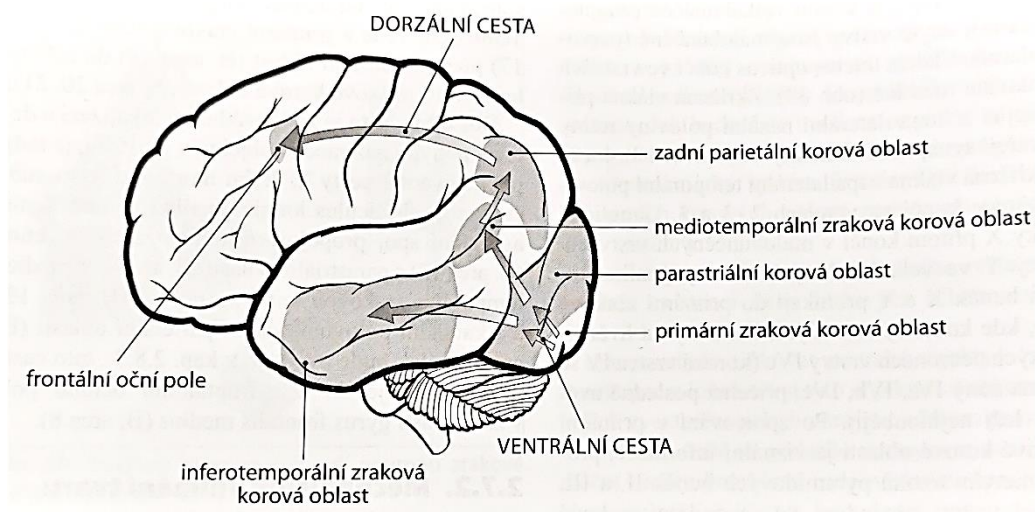
Do corpus geniculatum laterale (CGL) jsou projikovány axony X a Y nervových gangliových buněk, zde tvoří synaptická spojení s nervovými buňkami podobných vlastností. CGL je vrstevnaté a jeho jádro je složeno ze šesti vrstev nervových buněk, jež jsou separované tenkými pruhy axonů a dendritů. Jednotlivé vrstvy jsou popsány čísly 1-6, a začíná se od té, co leží nejvíce vpředu. První dvě vrstvy tvoří velké buňky, takže jsou označovány jako velkobuněčné neboli magnocelulární, ostatní buňky ve vrstvách 3-6 jsou nazývány jako malobuněčné neboli parvocelulární.

Zkřížená vlákna optického traktu, která přichází do CGL, z nazálních polovin obou sítnic tvoří synaptická spojení s vrstvami 1,4 a 6. Nezkřížená vlákna z temporálních částí sítnic se napojují s vrstvami 2, 3 a 5.

V parvocelulárních vrstvách končí X gangliové buňky a v magnocelulárních zase Y. Axony nervových buněk X a Y z CGL vedou do primární zrakové dráhy, konkrétně na hvězdíkovité buňky IVc. Poté co je zraková informace zpracována ve V1, tak je pomocí axonů pyramidových buněk II. a III. vrstvy kortexu přepravena do zrakové asociační korové oblasti (V2). V asociačních korových oblastech lze opět rozlišit dvě informační cesty, jež jsou zde označovány jako ventrální a dorzální, viz Obr. 6.

Ventrální cesta je další průběh X cesty. Přisuzuje se jí rozbor jemné struktury a barvy sledovaného objektu. Morfologický základ, zde tvoří fasciculus longitudinalis inferior, který spojuje Brodmannovy areae (B.a.) 17. s 18. a tu potom s 20 a 21.

Dorzální cesta tedy vychází z informační cesty Y a jejím úkolem je detekce umístění a pohybu sledovaného objektu v prostoru. Morfologickým základem a asociačním spojem je fasciculus longitudinalis superior, spojuje V1 (Brodmannova area 17) s V2 (parastriální korovou oblast, B.a. 18; mediotemporální zrakovou korovou oblast, B.a. 19; a kaudální půlku zadní parietální korové oblasti, B.a. 7a). Dorzální cesta dále vede do tzv. frontálního očního pole, které je umístěno v zadní části gyrus frontalis medius (B.a. 8). Mechanismy zpracování zrakové informace se rozdělují podle percepce určité vizuální vlastnosti na vnímání tvaru pozorovaného objektu, vnímání pohybové složky vizuální informace, barevné vidění a prostorové vidění.



Obr. 6 Ventrální a dorzální cesta v oblasti V2. Ve ventrální cestě, je rozlišován nazíraný objekt a v dorzální cestě je detekována poloha a pohyb objektu. [18]

Vnímání tvaru pozorovaného objektu

Vnímání tvaru je založeno na rozpoznání kontrastu, to znamená schopnost diferencovat jas dvou rozhraní. U všech živočichů, kteří mají barevné vidění, se percepce tvaru ještě zlepšuje kvůli způsobilosti detekovat kontrast, jež je určen rozdílnými barvami dvou ploch o rozdílných vlnových délkách.

Jak již bylo zmíněno, za bezchybné vnímání struktury podnětu je zodpovědná X cesta, která pokračuje ventrální dráhou. Elementární metodou, kterou je tvar pozorovaného objektu kódován, závisí na odlišném podnícení fotoreceptorů obrazem, který má kontrastní linie a jež se promítá na retinu. Sítnice má ale současně s tímto ještě vlastní způsob, kterým zvětšuje rozdíl v hladině podnícení fotoreceptorů, čímž ulehčuje rozpoznání kontur pozorovaného objektu. Jedná se o metodu tzv. laterální inhibice a jsou za ní zodpovědné horizontální buňky. Tyto buňky zapřičiňují, že elektrická činnost okolních fotoreceptorů je reálně nižší než podnícení příslušné hladině daného osvětlení.

Elektrické synapse propojují navzájem horizontální buňky, a tak se velikost jejich působení do stran zvětšuje. [18]

Z výzkumu receptivních polí byla zjištěná podobnost chování a uspořádání receptivních polí gangliových buněk s buňkami CGL a s malými hvězdicovitými neurony ve V1 (vrstva IV. dolní část). Poslední zmíněné navazují synaptické spoje s dvěma odlišnými typy neuronů, někdy jsou též nazývány jako orientačně citlivé buňky. Byly popsány dva typy buněk s orientační citlivostí.

Sloupce orientační specifity

Simplexní (jednoduché) buňky (ve vrstvě IV. primární zrakové kůry) mají receptivní pole tvořené centrální excitační zónou a periferní inhibiční zónou. Jejich centrální zóna (kruhové místo stejně jako u gangliových buněk sítnice nebo CGL) má protáhlý tvar. Relevantním podnětem je světelný kontrastní pruh o šířce excitační zóny receptivního pole (r.p.) a dané orientace (orientace ve směru prodlužování r.p. má za následek maximální odezvu), pouze pokud zaujímá přesnou polohu v receptivním poli (kvůli periferní inhibiční zóně). Předpokládá se, že sloučením několika hvězdicovitých nervových buněk IV. vrstvy na jedinou buňku se vytvořilo receptivní pole. Simplexní buňky dávají v další úrovni informační cesty X za vznik synaptickým kontaktům s komplexními buňkami.

Komplexní buňky (na povrchu vnější vrstvy IV.) mají také specifickou orientační osu, ale mají větší receptivní pole oválného tvaru, to ale nemá specifikovanou periferní inhibiční zónu. Vykazují směs ON a OFF odezvy v celém svém receptivním poli, jako by přijímaly aferenty z několika jednotlivých buněk. Vhodným podnětem je znovu kontrastní pruh. Jsou také citlivé na orientaci podnětu bez ohledu na jeho polohu v zorném poli. Dále tyto složité buňky reagují na pohyb orientovaného podnětu, pokud je tento pohyb kolmý k ose jeho orientace. Pozdější analýzy také odhalily kortikální neurony citlivé na délku světelného pruhu pohybujícího se v receptivním poli, neurony, jejichž frekvence pálení klesá, když tento pruh překročí určitou délku. [8,18]

Sloupce oční dominance

Sloupce oční dominance jsou nervové buňky, které získávají počáteční informaci z jednoho oka a řadí se do struktury s pruhy kolmo k povrchu kortexu. Pruhy, co jsou vedle sebe zahrnují nervové buňky, jejichž receptivní pole se nachází ve stejné lokalitě sítnic obou očí. Stejnostranné části sítnic tvoří vstup pro jeden sloupec a pro další,

sousední zase opačných částí sítnic. Další typické slučování zmiňovaných buněk bylo pozorováno i vevnitř v jednotlivých sloupcích. [18]

„Ice cube“ x „pinwheels“

Sloupce orientační specifity jsou simplexní a komplexní buňky, které mají stejnou polohu receptivních polí na sítnici jednoho oka a jejichž receptivní pole jsou stejně funkčně orientována. Orientační buňky jsou uspořádány do sloupců (sloupec seskupuje buňky citlivé na stejnou orientaci), které jsou užší než sloupce oční dominance, které jsou uspořádány kolmo na ně. Tato hypotéza se nazývá „ice cube“ model korových modulů, ve kterých jsou sloupce oční dominance a orientace ortogonální. Avšak tento model kolumnárního uspořádání orientačních buněk ve V1, předpokládal lineární zlepšení orientační citlivost, to ale nekorespondovalo s otáčením podnětu. [10, 13, 18]

V této studii Bonhoeffer a spol. [19] byly zkoumány tyto (izo)orientační sloupce V1. Bonhoeffer a spol. používali in vivo optické zobrazování založené na vnitřních signálech ke shromažďování informací o reakcích části kůry na mřížky v mnoha různých orientacích. Bylo zjištěno, že kortikální oblasti, které nejlépe reagují na jednu orientaci, tvoří vysoce uspořádané cirkulární skvrny spíše než sloupce. Tyto izo-orientační skvrny jsou organizovány kolem „orientačních center“ a vytvářejí vzory podobné větrníku tzv. pinwheels, ve kterých se preference orientace buněk průběžně mění napříč kůrou.

Větrníky a orientační centra jsou natolik výrazným organizačním prvkem, že by mělo být důležité porozumět jejich vývoji a také jejich funkci při zpracování vizuálních informací. Na základě poznatků o vhodných podnětech pro tyto orientační buňky byly zvoleny kontrastní světelné pruhy určité orientace a délky (terč CAM simulátoru). [13, 19]

Dále se ve směru toku vizuálních informací v asociační kůře (V2) objevují neurony, které mají za úkol ještě detailnější detekci komplexnějších rysů pozorované scény, jsou nazývány jako tzv. hyperkomplexní. Stimuly pro podráždění těchto neuronu jsou nepravidelného, těžko popsatelného tvaru. [18]

Vnímání pohybové složky vizuální informace

Jak již bylo zmíněno informační cesta pro pohybovou kvalitu zrakového podnětu je složena z Y nervových buněk a přechází v dorzální cestu. Výzkum receptivních polí

prokázal přítomnost buněk senzitivních na pohyb struktury, jež mají dvě elementární vlastnosti.

První z nich je specifická směru. Tyto nervové buňky jsou aktivní podle směru, kterým se pozorovaný podnět hýbe v receptivním poli. Lze u nich rozpoznat směr, který upřednostňují, to je tzv. preferovaný a ten vyvolává maximální odezvu, nebo tzv. nulový směr, jež je většinou opačný k preferovanému a podněcuje minimální buněčnou odpověď.

Druhou vlastností je senzitivita na dané rozmezí rychlosti pohybu podnětu ve vizuální scéně. Vnímání pohybu je považováno za nejpodstatnější zrakovou kvalitu, jelikož v situacích, kdy jde o život jedince, má nepostradatelný význam. Proto je nejspíše způsoblost pro vnímání pohybu a směru podnětu přítomna u všech savčích novorozeňat, kdy jiné funkce vizuálního systému nejsou ještě vyvinuté. [18]

Jelikož nejsou u námi vytvořené stimulační stěžejní mechanismy barevného a prostorového vidění, nebudou v této práci rozváděny.

3.1.2 Procesy ovlivňující zrakové vnímání

Přednost globálních funkcí ve vizuálním vnímání

Předpokládá se, že globální strukturování vizuální scény (global precedence) předchází analýze místních rysů (local precedence). Jedná se o analýzu obrazu, kdy zpracování probíhá od obecného (globálního) ke konkrétnímu (lokálnímu), tzv. princip FOREST BEFORE TREES. [14, 15, 35-36]

Ve studii Navon [35], byla probandům předložena velká písemna vytvořená z malých písmen (viz Obr. 7) a ta musela být rozpoznána na lokální nebo globální úrovni. Zatímco identita malých znaků neměla žádný vliv na rozpoznání velkých, globální podněty, které byly v rozporu s místními, potlačovaly reakce na místní úrovni. Bylo tedy

EEEEEE	SSSSSS
E	S
E	S
EEEEEE	SSSSS
E	S
E	S
EEEEEE	SSSSSS

Obr. 7 Příklad globálních a lokálních vlastností složených písmen. [43]

potvrzeno, že globální rozdíly byly detekovány častěji než lokální rozdíly. Globální přednost ukazuje na řadu možných výhod, jako je využití informací s nízkým rozlišením, šetření zdrojů zpracování a jednoznačnost nevýrazných detailů.

V dalších dvou experimentech této studie byli probandi požádáni, aby odpověděli na zvukově prezentovaný název písmene, a přitom se dívali na vizuální podnět, který se sestával z velkého znaku (globální úroveň) vytvořeného z malých znaků (místní úroveň). Reakce na sluchovou diskriminaci subjektů byly ovlivněny pouze globální úrovní, nikoli místní úrovní. Tyto výsledky ukazují, že je věnovaná pozornost vizuální stimulaci, ale není jediným zdrojem informací, který ovlivňuje chování.

Soudí se, že probandi se mohou dobrovolně soustředit pouze na globální úroveň, ale nikdy ji nemůžou přeskočit, aby mohli jako první zpracovat lokální, což podporuje myšlenku globální přednosti. [35]

Vliv 2. Leveltova zákona

Jedná o tzv. antisupresní zákon, který popisuje, jak „zesílení“ podnětu viděného jedním okem je nepřímě úměrné snižování doby jeho utlumení, avšak časový úsek, kdy je podnět dominantní zůstává nezměněný.

Při konstruování naší stimulace bylo využíváno poznatků 2. Leveltova zákona o supresních mechanismech, kam se řadí zkrácení délky suprese prostřednictvím kontrastu, prostřednictvím pohybu sledovaného obrazu, prostřednictvím souladu v multisenzorické integraci a významových souvislostí podporujících zrakový podnět. [14-15, 111]

3.2 Vnímání sluchu

O funkci sluchových korových oblastí (Brodmannova area 41. a 42.) je toho známo relativně málo, oproti zrakové a somatosenzorické kůře. Většina poznatků byla získána z pokusů při rozrušení nebo odstranění určitých částí této kůry. [18]

3.2.1 Prostorové slyšení

Člověk je schopen velmi přesné detekce zvuku, pokud vychází ze zdroje v prostoru, jež neruší odrazy. Při dobrých podmínkách je člověk schopen rozeznat umístění šíření zvuku v rozsahu 10° v horizontálním směru, ve vertikálním směru není tato schopnost tak přesná. Schopnost lokalizovat zvuk se nazývá prostorové slyšení a její základní podmínkou je tzv. binaurální slyšení (oběma ušima). Při slyšení oběma ušima

uplatňuje systém sluchu pro zvukové umístění dvou pomůcek tzv. časového a intenzitního klíče.

U časového klíče se jedná o to, že daná část zvukové vlny přichází k jednomu uchu dříve a k druhému se zpožděním. Intenzitní klíč závisí na akustickém stínu hlavy, ucho, co je dál od zdroje zachycuje zvuk o nižší intenzitě než druhé ucho. Časový klíč je využíván pro umístění zvuku o nižší frekvenci (cca do 2kHz). Oproti tomu intenzitní klíč je důležitý pro lokaci vysokofrekvenčních akustických vln.

Za vyhodnocení časových a intenzitních odchylek zvukových signálů jsou odpovědné tzv. binaurální neurony, které jsou lokalizovány hlavně v nucleus olivaris superior. Dendrity těchto neuronů mohou nabírat informace o zvuku ze stejnostranného komplexu i z komplexu z opačných stran kochleárních jader. Seskupení dendritů tvoří bázi pro zvážení toho, jaký mají vliv synaptické inputy obou uší. Předpokládá se, že velmi důležitou strukturou pro vyhodnocování umístění zvukového zdroje by mohl být corpus geniculatum mediale, colliculus inferior a sluchový kortex.

Odchylka zvukového signálu obou klíčů je nulová, proto na ni nelze spoléhat při lokalizaci zdroje v rovině, která prochází středem těla předozadně a všemi rovinami s ní rovnoběžnými. Jelikož metoda umístění v této rovině závisí na jednom uchu a upotřebuje směrového efektu boltce. Jež utváří odlišný akustický stín a také odrazy pro akustické zdroje, které mají rozdílná umístění ve výše zmíněné mediální sagitální rovině. Avšak v horizontální rovině je zacílení umístění akustického zdroje v prostoru asi pětinasobně vyšší. [18]

3.2.2 Dopplerův efekt při vnímání směru pohybujících se zdrojů zvuku

Ze studie Oechslin a spol. [61] vyplývá, že i když ještě nevidíme zdroj zvuku, zpracování sluchových informací nám již umožňuje identifikovat směr pohybujících se akustických zdrojů. V této studii byly uvažovány zdroje zvuku, které se radiálně pohybují směrem k posluchači a od něj a vydávají signály s konstantní amplitudou (stejně jako je tomu v našem experimentu). Z experimentu s využitím syntetizovaných zvuků ve virtuálním prostředí vyplývá, že ke správné identifikaci, zda se pohybující zdroj zvuku přibližuje nebo vzdaluje, se využívá tzv. Dopplerova jevu, který mění frekvenci přímého zvuku a jeho odrazy.

Byla potvrzena zásadní role Dopplerova jevu jako základního principu pro identifikaci směru pohybujících se zvuků. Předpokládá se, že pozorovatelé jsou

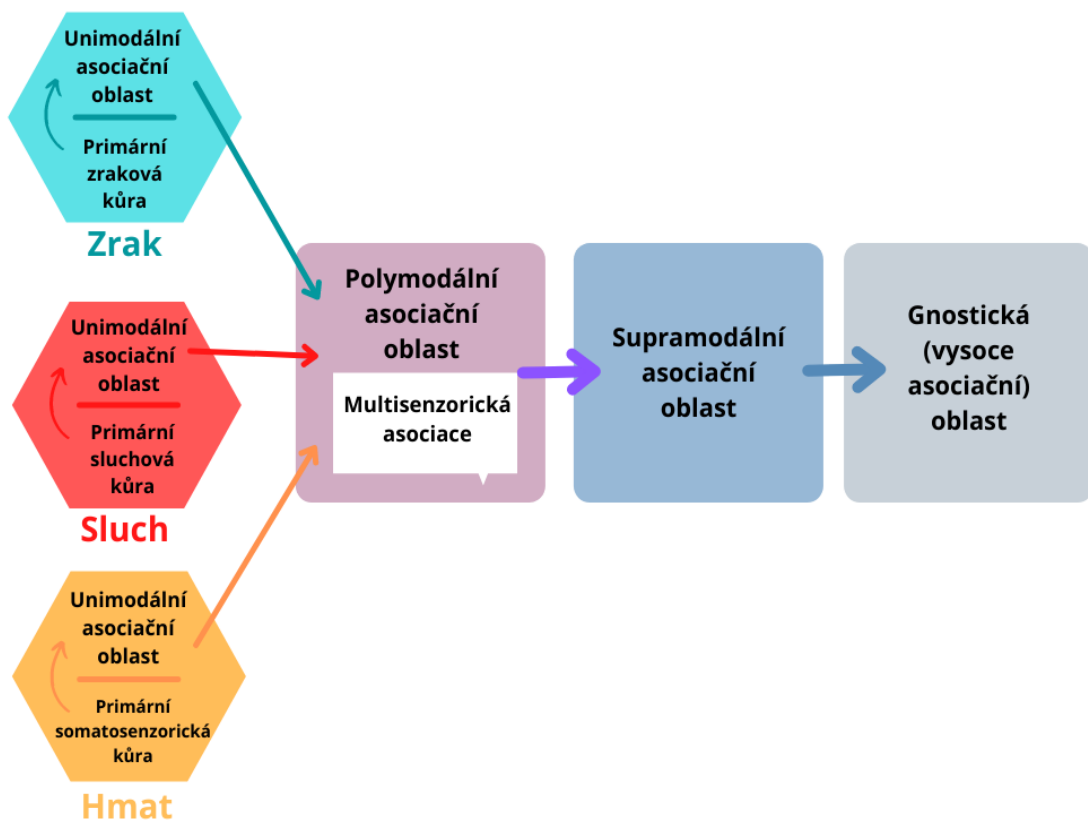
citlivější na přibližující se zdroje zvuku než na ty, které se vzdalují. Jelikož vzdalující zvuky se subjektům určovali hůře.

Směr pohybujících se zdrojů zvuku, které vyzařují akusticky složité signály a jsou proto silně ovlivněny Dopplerovým jevem, lze správně identifikovat. Tento efekt je třeba chápat jako nezávislý na změnách amplitudy, což je v souladu se situacemi vyskytujícími se v přírodě, kde pozorovatele může oddělovat velká vzdálenost od pohybujícího se zdroje zvuku.

Značný účinek selektivního vnímání zvuků pohybujících se směrem k pozorovatelům, předpokládá, že způsob zpracování tohoto vnímání je řízen předvědomými mechanismy. [61]

4 Multisenzorická integrace

Multisenzorická asociace vzniká integrací smyslových informací o jednom podnětu z více smyslových modalit. Zraková, sluchová a somatosenzorická modalita si zpracovává vlastní informaci o podnětu ve své primární korové oblasti a následně v unimodální části sekundární korové oblasti. Multisenzorická integrace neboli slučování vjemů z těchto smyslových modalit má předpokládaný průběh z polymodální asociační korové oblasti (někde též multimodální), odkud dále jako multisenzorická asociace přechází do supramodální asociační oblasti a odtud do gnostické vysoce asociační oblasti. Schéma tohoto průběhu viz Obr. 8. K funkcím gnostické oblasti se řadí způsobilost rozpoznávání předmětů a jevů zrakem, sluchem a hmatem. [14,15,16, 18,39]



Obr. 8 Schéma předpokládaného průběhu multisenzorické asociace. [14-15]

4.1 Multisenzorická integrace a neuroplasticita

Existuje silná interakce mezi multisenzorickým zpracováním a neuroplasticitou lidského mozku. Schopnost vnímat a chápat okolní svět se v podstatě opírá o multismyslovou integraci. Příchozí informace z více smyslů jsou sjednoceny, aby se vytvořil koherentní vjem, nebo segregovány, aby se oddělily odlišné části. [141, 142]

Zkušenosti a trénink v různých oblastech mění způsob, jakým jsou senzorycké informace integrovány. Bylo potvrzeno, že modely multisenzoryckých tréninků jsou zvláště účinné při řízení funkční a strukturální plasticity. Multisenzorycký trénink tedy má vliv na smyslové zpracování u zrakové, sluchové a somatosenzorycké modalit, a také na funkční a strukturální propojení unisenzoryckých a multisenzoryckých oblastí mozku. Studie [143, 144] ukázaly, že intenzivní trénink kognitivního nebo motorického procesu indukuje plastické změny v základních kortikálních strukturách. [39]

4.1.1 Multisenzorycký mozek

Anatomické struktury a dráhy podporující multisenzoryckou integraci

V celém mozku na kortikální a subkortikální úrovni existuje několik anatomických struktur, které vykazují multisenzorycké charakteristiky. Mezi oblasti na kortikální úrovni, které se obvykle označují jako multisenzorycké, patří: kůra podél horního temporálního sulku (STS), kůra podél intraparietálního sulku (IPS) a frontální kůra. Rostoucí množství dat ukazuje, že oblasti tradičně považované za unimodální senzorycké obsahují také neurony s multisenzoryckými atributy [141, 142]. Kromě toho existují dráhy bílé hmoty, které spojují různé unisenzorycké oblasti nebo nesenzorycké oblasti s asociačními oblastmi vyššího řádu, a proto jsou také považovány za multisenzorycké [145-147].

V horním temporálním sulku (STS) byly potvrzeny multisenzorycké charakteristiky studii, které využívaly funkční magnetickou rezonanci (fMRI) [148,149] a magnetoencefalografii (MEG) [150]. Tyto studie prokázaly, že STS reaguje silněji na kongruentní audiovizuální podněty než na nekongruentní. Na zvířecích modelech bylo potvrzeno, že přibližně 23 % neuronů reagujících na zrakem zpracovávaný pohyb je významně modulováno odpovídající sluchovou složkou [151].

Kůra podél intraparietálního sulku (IPS) hraje roli v multisenzoryckém zpracování pohybu a prostoru a integruje hmatové, zrakové a sluchové informace [152]. Studie Bremmera a spol. [153] používající fMRI uvedla, že oblast IPS integruje vizuální, hmatové a sluchové podněty za účelem vytvoření multimodální reprezentace pohybu. Podobné výsledky byly pozorovány v jiné fMRI studii Makin a spol. [154], která odhalila, že zadní IPS a laterální okcipitální komplex představují prostor soustředěný na ruku převážně vizuálním způsobem (interakce oko-ruka), zatímco přední IPS využívá k reprezentaci pohybu v prostoru multisenzorycké informace [2, 154]. Výsledky studií na zvířecích modelech navíc naznačují, že senzorycké reakce v IPS mohou být

řízeny jakoukoli vstupní modalitou a jsou charakterizovány složitou závislostí na úkolu [155-157]. Předpokládá se, že laterální okcipitální komplex a zadní střední temporální kortex reagují na multisenzorickou stimulaci s preferencí tvarové reprezentace a pohybu [158].

Prefrontální oblasti také souvisí s multisenzorickou integrací [159]. Studie fMRI Noppeney a spol. [160] naznačila, že frontální sulcus inferior vykazoval zvýšenou aktivitu v úkolech, které se spoléhaly na kombinaci sluchových a vizuálních informací. Další studie Belardinelli a spol. [161] a Paraskevopoulos a spol. [162] indikovaly zvýšenou aktivitu v dolním frontálním sulku, když byly subjekty konfrontovány s nekongruentními audiovizuálními páry.

Několik studií fMRI [163-165] a MEG [166-167] prokázalo modulaci sluchové kůry prostřednictvím vizuálního nebo somatosenzorického vstupu. Podobně se ukázalo, že neurony ve V1 modulují svou odpověď na krátký vizuální záblesk při současné sluchové stimulaci [168].

Při zvažování kortikálních struktur, které jsou základem multisenzorického zpracování, je třeba rozlišovat mezi oblastmi, které modulují jejich aktivitu v reakci na bimodální nebo multimodální podněty, jako jsou ty popsané výše, a oblastmi, které vykazují supramodální charakteristiky, tj. oblasti, které provádějí specifický proces nezávisle na vstupní modalitě. Takové oblasti mohou zahrnovat Brocovu oblast, podoblasti intraparietálního kortexu a přední cingulární kůry [169-171].

Mezi oblastmi, které reagují na multisenzorické podněty na subkortikální úrovni, patří colliculus superior, který integruje multimodální vstup do prostorových map [172-173]. Multisenzorické procesy v této oblasti silně závisí na vstupu z neokortexu shora dolů (top down zpracování) [174]. Neurony v klastru také reagují na multisenzorické podněty, stejně jako ve striatu a amygdale [175-177]. Navíc se zdá, že thalamické neurony modulují svou odpověď na sluchové podněty v závislosti na kongruenci vizuální stimulace [178]. Dokonce i na úrovni mozkového kmene výzkum ukázal, že neurony modulují svou odpověď na základě kongruence audiovizuálních podnětů [179, 180].

Funkční úroveň multisenzorické integrace

Ukazatelem pro multisenzorické zpracování na funkční úrovni je oscilační fázová koherence příslušných neuronálních populací [181]. Ve studii Senkowski a spol. [182], využívající EEG se ukázalo, že behaviorální přínos zpracování bimodálních podnětů

(tj. rychlejší reakční časy) lze předvídat pomocí korelované oscilační aktivity přes frontální, okcipitální, centrální a senzomotorické oblasti ve frekvenčním rozsahu β = (13–30 Hz). Nyní se předpokládá, že korelovaná oscilační aktivita různých kortikálních oblastí je důležitá pro modulaci jejich komunikace, a tak umožňuje percepční vazbu [183].

V současnosti je více pohledů na funkčnost multisenzorického zpracování. První z nich navrhuje, že zpočátku je každý sensorický podnět zpracován nezávisle a teprve později je odeslán do zón multisenzorické konvergence v přísně hierarchické organizaci [184]. Tento průběh je popsán v úvodu 4. kapitoly, jako předpokládaný. Avšak ten je nyní široce zpochybňován kvůli druhému pohledu.

Druhý pohled naznačuje, že multisenzorické neurony existují v celé hierarchii zpracování a že v určitých případech mohou být unisenzorické oblasti vynechány a stimul tak může být přímo a nezávisle zpracován v multisenzorických oblastech [141, 185]. Nedávná elektrofyziologická data navíc ukazují integrační efekty již kolem 15–30 ms po nástupu stimulů, což potvrzuje určitou formu paralelního zpracování [180]. Tyto nové výsledky vedly k odlišným názorům, pokud jde o kroky zpracování multisenzorické integrace, zdůrazňující buď paralelní postup v celé hierarchii zpracování [186], nebo kritickou roli zpětnovazebních obvodů z multisenzorických až po unisenzorické oblasti [142]. Proto je důležité poznamenat, že když jsou zmíněny uni- a multisenzorické struktury, je odkazováno hlavně na funkčnost a nikoli na umístění. [39]

4.1.2 Multisenzorická plasticita

V rámci výzkumu neuroplastických změn souvisejících s multisenzorickým zpracováním byly vytvořeny základní modely a paradigmat. První paradigma se zaměřuje na otázku, zda se u kojenců vyvíjí specifická multisenzorická funkce, jako je crossmodální korespondence, či nikoli. Jsou zde zhodnoceny i efekty zrání mozkových struktur [187]. Druhým paradigmatem jsou neuroplastické účinky sensorické deprivace a deaferentace. Zejména se zkoumá funkce kortikálních oblastí, které byly postiženy deaferentací, a zda tyto oblasti následně přispívají k různým procesům [189,190]. Třetím paradigmatem jsou účinky dlouhodobého tréninku na multisenzorické struktury [191]. V následující části budou diskutovány studie z výše uvedených paradigmat, jež popisují efekty plasticity související se zkušeností v multisenzorickém zpracování. [39]

Efekty zrání

Výzkum studia multisenzorického zpracování se zaměřil na modulační účinky různých forem prožitku, včetně tréninku. Došlo k rozsáhlému zkoumání toho, jak zkušenosti během vývoje ovlivňují multisenzorické zpracování [195]. To naznačuje kritickou roli, kterou má zkušenost s cross-modálními stimuly ve vyvíjejícím se multisenzorickém mozku [196].

Ze studie Wallace a spol. [199] na zvířecích modelech vyplývá, že multisenzorická oblast mozkové kůry je během raného postnatálního života nedostatečně vyvinuta a multisenzorické neurony postrádají schopnost syntetizovat mezimodální (cross-modální) informace, které přijímají. Tato schopnost se vyvíjí postupně až poté, co se utvoří normální multisenzorický vstup [198]. Totéž platí i u lidí pro subkortikální multisenzorické oblasti, jako je colliculus superior [199]. Podobné výsledky byly získány u kojenců, kteří při testování v lokalizaci sluchových, vizuálních nebo audiovizuálních podnětů vykazovali účinky na reakční časy závislé na věku [200]. Zdá se však, že některé základní multimyslové procesy jsou zavedeny poměrně brzy v lidském životě, jak naznačují údaje o 5měsíčních kojencích, týkající se rozlišení zrakových, sluchových nebo audiovizuálních podnětů a zpracování audiovizuálních korespondencí mezi zesílením výšky zvuku a zesílením zrakového podnětu [187, 201].

Kromě těchto mezimodálních souvztažností, které se zdají být vrozené nebo vytvořené velmi brzy v životě, se nové generují učení prostřednictvím zkušeností, jako jsou obrazy a k nim odpovídající zvuky (kočka mňoukání, kráva bučení, nebo kladivo a zvuk nárazu na hřebík). Učení těchto audiovizuálních souvztažností modifikuje jejich kortikální reprezentaci, a tak když je narušeno, vytváří nesouladnou odpověď generovanou v multisenzorických kortikálních oblastech, jako je laterální okcipitální komplex a horní temporální gyrus. [202-203]

Výsledky konzistentně ukazují, že mezimodální korespondence, které se spoléhají na časové nebo prostorové vztahy podnětů, jsou přítomny již v raném věku, zatímco ty, které se spoléhají na sémantické vztahy, se postupně vyvíjejí později v životě na základě vystavení relevantním zkušenostem [204]. Brandwein a spol. [188] zkoumali dozrávání audiovizuální integrace srovnáním behaviorálních a neurofyzilogických reakcí subjektů ve věku od středního dětství do rané dospělosti. Jejich behaviorální výsledky naznačovaly postupné ladění multisenzorické facilitace na jednoduchém úkolu audiovizuálního reakčního času, který dosáhl úrovně stejné jako u dospělých, už ve věku 14 let. Tyto výsledky pozitivně korelovaly se zvýšením amplitudy neurofyzilogických odpovědí

ve frontocentrální oblasti při latenci kolem 100–120 ms, což ukazuje, že zrání vyvolává neurální i behaviorální výhody v multisenzorickém zpracování.

Smyslová deprivace

Studie o plasticitě způsobené senzoričkou deprivací významně přispěly ke znalostem neuroplasticity multisenzorických procesů souvisejících se zkušeností. Což naznačuje, že deprivace senzoričké modalit vede k reorganizaci neurokognitivních funkcí. Níže uvedené studie ukazují rozsah plastických změn, které jsou možné na kortikální úrovni po senzoričké deprivaci.

Ve zrakové kůře nevidomých subjektů byly pozorovány zkřížené modální aktivity u hmatových úloh (čtení Braillova písma) a sluchových úloh (lokalizace zvuku v prostoru) [205-206]. Transkraniální magnetická stimulace (TMS) může v okcipitálních oblastech u nevidomých subjektů vést k narušení úloh tvorby jazyka, jako je generování slov [207]. Naopak Pekkola a spol. [129] prokázali, že vizuální řečové podněty aktivují primární sluchovou kůru u vrozeně neslyšících subjektů, což je fenomén přítomný také u uživatelů kochleárních implantátů [208-209]. Studie [189-190] se také zabývají senzoričkou deprivací v kontextu multisenzorické integrace. [39]

Účinky dlouhodobého tréninku na multisenzorické mozkové struktury

Aby bylo možné studovat dlouhodobé účinky multismyslového tréninku, několik studií použilo průřezový přístup srovnávající hudebníky s kontrolní skupinou [210]. Dlouhodobý hudební trénink zvyšuje propojení sluchového a zrakového vstupu během pasivního pozorování. Navíc jsou pomocí fMRI ve studii Haslinger a spol. [212] dokumentované sluchové aktivity u pianistů, kteří pouze pozorovali někoho hrát na klavír.

Paraskevopoulos a spol. [162] pomocí MEG zkoumali účinky dlouhodobého hudebního tréninku na audiovizuální integraci abstraktních pravidel, která se týkají sluchových a vizuálních informací. Subjekty v této studii musely identifikovat kongruentní a nekongruentní audiovizuální podněty podle pravidla „čím vyšší výška tónu, tím vyšší poloha kruhu“. Výsledky ukázaly, že hudebníci ve srovnání s nehudebníky vykazovali větší rozdíl aktivit mezi kongruentními a inkongruentními podněty v pravém horním frontálním gyru, pravém superiorním temporálním gyru a pravém lingválním gyru, což naznačuje, že dlouhodobý multimodální trénink hudebníků ovlivňuje audiovizuální integraci.

Efekty související s tréninkem mohou být také zcela specifické. Ve studii [160] pomocí fMRI se ukázalo, že hudebníci zlepšili zpracování audiovizuálních asynchronií v úkolu souvisejícím s hudbou, ale ne v jazykovém úkolu. Multisenzorický trénink hudebníků mění nejen vzorce kortikální aktivity, které zpracovávají multisenzorické podněty, ale také funkční konektivitu mezi STS, premotorickou kůrou a mozečkem.

Multisenzorické zpracování se zdokonaluje v důsledku rozsáhlého tréninku, což bylo také pozorováno v subkortikálních oblastech mozkového kmene. Multisenzorický trénink zlepšuje kortikální konektivitu na anatomické úrovni. [39, 213]

4.1.3 Účinky multisenzorického tréninku na neuroplasticitu

Výše uvedené studie použily průřezový přístup ke zkoumání multisenzorické neuroplasticity vyvolané zkušeností. Tento přístup může být vysoce informativní, pokud jde o dlouhodobé účinky zkušenosti, ale nemůže být použit ohledně konkrétních prvků zkušenosti, které tyto neuronální změny řídí, ani neumožňuje kauzální závěry. Aby bylo možné tyto problémy řešit, několik studií použilo longitudinální přístup s tréninkovými protokoly zahrnujícími specifické, dobře řízené multisenzorické prvky. Podněcená plasticita byla poté hodnocena porovnáním neuronální aktivity před a po tréninku, nebo porovnáním reakcí na trénované proti netrénovaným podnětům po tréninku.

Tréninková studie využívající MEG [194] tvrdí, že plasticita způsobená krátkodobým multisenzorickým tréninkem mění funkci samostatných multisenzorických struktur, nejen těch unisenzorických spolu s jejich vzájemným propojením. V této studii byli nehudební jedinci trénováni, aby přehrávali tónové sekvence z vizuálně prezentovaných tónů v systému podobném hudební notaci (audiovizuální somatosenzorický trénink), zatímco další skupina absolvovala audiovizuální výcvik, který zahrnoval prohlížení tohoto tónového zápisu a pozorné naslouchání nahrávek tréninku první skupiny. Audiovizuální kortikální reakce, byly hodnoceny před a po tréninku. Výsledky ukazují, že oblast v pravém horním temporálním gyru byla ovlivněna vstupem ze všech tří modalit během tréninkové procedury takovým způsobem, že neuroplastický efekt krátkodobého multisenzorického tréninku modifikoval její funkci.

Dále se sem řadí i studie o získávání nových multisenzorických asociací, jež budou blíže rozebrány ve stejnojmenné kapitole 5.3. [39]

Klinický význam multisenzorického tréninku

Stále rozšířenější jsou rehabilitační přístupy, které využívají komplexní, multismyslové tréninkové úkoly. Multisenzorický trénink má velké uplatnění v rehabilitaci po cévní mozkové příhodě, pro pacienty s Parkinsonovou chorobou, Alzheimerovou chorobou. [146, 224, 226]

Hudební trénink je jedním z nejvíce studovaných typů intervencí. Jak z hlediska behaviorálních výsledků, tak základní fyziologické neuroplasticity jsou multisenzorické terapie podporované hudbou lepší než tradiční přístupy motorické rehabilitace. [224-225]

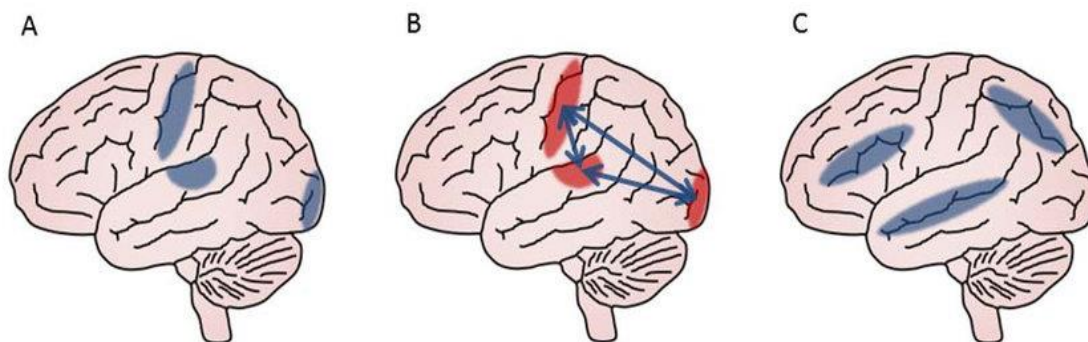
Multisenzorické zpracování nevykazuje takový pokles související s věkem jako jednosmyslové zpracování a v některých případech je dokonce u starších jedinců ve srovnání s mladšími ještě vylepšeno [227].

Existují kortikální funkční a strukturální spojení (a další mozkové charakteristiky), které mohou předurčovat, do jaké míry jednotlivci mohou těžit z multisenzorické tréninkové intervence. Například síla existujících spojení mezi zrakovými a sluchovými oblastmi nebo mezi sluchovými a motorickými oblastmi může předpovídat, jak rychle se účastník může naučit sluchově-vizuální nebo sluchově-motorický úkol. [39]

4.1.4 Funkční rámce multisenzorické plasticity

Architektura mechanismů, na kterých závisí změny v multisenzorické integraci, zůstává stále nejasná [189]. Navrhované rámce zdůrazňují buď roli dopředných (feed-forward) a zpětnovazebních (feed-back) obvodů mezi multisenzorickými a unisenzorickými oblastmi, nebo změny probíhající nezávisle v rámci multisenzorických nebo unisenzorických struktur [142, 216-218]. Tyto různé rámce jsou znázorněny na Obr. 9. Avšak stále více důkazů o tom, že neurony s multisenzorickou funkcí existují v oblastech mozku, které byly tradičně považovány za nesenzorické, omezuje závěry týkající se přísné strukturální lokalizace do unisenzorických a multisenzorických oblastí mozku. Protože existují důkazy o změnách na všech úrovních, zdá se, že multismyslový trénink mění zpracování na nižších i vyšších úrovních v tocích smyslového zpracování a zároveň mění jejich funkční a strukturální spojení.

Důkazy o důležité roli zpětné vazby a dopředných spojení mezi unisenzorickými a multisenzorickými strukturami pocházejí z několika studií. Multisenzorická tréninková studie Scholze a spol. [216] naznačila změny v traktech bílé hmoty v důsledku několikátýdenního multisenzorického tréninku.



Obr. 9 Ilustrace různých modelů a funkčních rámců pro multisenzorickou plasticitu. Struktury, které jsou modifikovány trénovanými oblastmi, jsou obarveny modře. **A:** Multisenzorický trénink modifikuje unisenzorické struktury, což umožňuje vylepšené unisenzorické zpracování, které zase posílá svůj výstup do multisenzorických oblastí vyššího řádu. **B:** Multisenzorický trénink upravuje dopředné a zpětné vazby mezi unisenzorickými strukturami, což umožňuje lepší komunikace mezi různými modalitami. **C:** Multisenzorický trénink upravuje multisenzorické struktury přímo, což umožňuje vylepšené multisenzorické zpracování. [39]

Ve studii na zvířecích modelech Jiang a spol. [174] prokázali, že narušení zpětnovazebního okruhu z kortikální multisenzorické oblasti do colliculus superior u koček eliminuje multisenzorické charakteristiky neuronů colliculus superior, zatímco se zdá, že posílení stejných thalamokortikálních spojení usnadňuje multisenzorické zpracování během zrání [219]. Tuto představu dále podporuje několik studií o kortikální funkční konektivitě [181, 220-221, 228-229].

Jiné studie zdůrazňují změny, ke kterým dochází v rámci multisenzorických struktur. Nedávná studie MEG od Paraskevopoulos a spol. [194] uvedla, že plasticita způsobená krátkodobým multismyslovým tréninkem změnila multisenzorické struktury zapojené do tréninku, nikoli ty unisenzorické a jejich vzájemné propojení. Výsledky ukázaly, že výrazné multisenzorické podněty mohou obejít primární smyslové kůry a mohou být zpracovány přímo v multisenzorických oblastech. To zdůrazňuje možnost, že multisenzorické oblasti jsou ty, které se mění prostřednictvím zkušenosti [185]. Doplňující důkazy pro tento model pocházejí z tréninkových studií fMRI, které naznačují plasticitu struktur tradičně považovaných za multisenzorické [214, 215, 222]

Studie percepčního učení zdůrazňují kritickou roli změn probíhajících v unisenzorických oblastech, jež budou blíže rozebrány v podkapitole 5.1. V této souvislosti se předpokládá, že trénovaná unisenzorická reprezentace snižuje neurální práh potřebný pro aktivaci těchto struktur a v důsledku toho dostávají „downstreamové“ multisenzorické struktury zvýšený vstup. Toto zjištění je dále podpořeno studii naznačujícími plastické efekty v důsledku multisenzorického tréninku v rámci unimodálních procesů. [192, 193, 218, 223]

Na funkční úrovni se navrhované mechanismy nemusí vzájemně vylučovat. Různé mechanismy mohou skutečně odpovídat za různé formy učení nebo mohou dokonce koexistovat na různých hierarchických úrovních [220]. [39]

5 Multisenzorické učení

Lidský mozek pracuje tak, aby se vyvíjel, učil se a optimálně fungoval v multisenzorických prostředích. Zkušenosti získané z okolí zahrnují neustálou multismyslovou stimulaci. Vizuelní a sluchové informace jsou integrovány při provádění mnoha úkolů, které zahrnují lokalizaci a sledování pohybujících se objektů, jak již bylo zmíněno výše. Studie učení, a především percepčního učení, se ovšem zaměřily na trénink s podněty pouze pro jednu smyslovou modalitu, ale to nemusí být vždy pro učení optimální.

Příkladem toho, proč je lepší zapojení více smyslových modalit, může být předpoklad, že dospělý jedinec se chce naučit rozlišovat různé druhy ptáků. Snaha o vyvinutí, co nejlepšího tréninku k získání této dovednosti může zahrnovat více typů učení a zde se zaměříme na aspekty percepčního učení, a to přímo zlepšení percepčních dovedností, které umožňují rozpoznání a rozlišení ptáků. Na základě mnoha studií vizuelního percepčního učení [223,230-233], může být předpokládáno, že jej lze získat prostřednictvím tréninku s obrázky nebo videoklipy ptactva označenými názvy druhu. Studie [235-237] ukazují, že jednoduchý úkol detekce jemného zrakového podnětu může vyžadovat mnoho tréninku pouze s malým přírůstkem výkonu. Cvičení by bylo jednodušší, kdyby úkol kombinoval obrázky se zvukem, protože ptačí zpěv je další funkcí, kterou lze použít na rozlišení různých druhů.

Byl vznesen dotaz, co se stane, když by jedinec musel rozlišovat mezi druhy pouze na základě obrázků při absenci jakéhokoli zvuku, a zda bude cvičení se zrakově-sluchovými (tj. multismyslovými) podněty stále prospěšné, pokud konečným cílem učení je pouze vizuelně je rozlišit. Dlouho bylo předpokládáno, že by tato situace učení nepomohla, a dokonce by mohla být narušujícím prvkem, který odvádí pozornost od vizuelní scény. Byla však doložena zjištění, která ukazují opak. Multisenzorické interakce jsou všudypřítomné v nervového systému a vyskytují se v raných stádiích percepčního zpracování.

V tomto příkladu bylo potvrzeno, že protokoly multisenzorického tréninku, na rozdíl od unisenzorických, mohou lépe simulovat přirozené prostředí, a proto produkovat větší a efektivnější percepční učení. Nicméně, do jaké míry tato facilitace nastane závisí na vhodných vztazích (tj. kongruenci) mezi informacemi přicházejícími do každého ze smyslů.

Informace o multisenzorických interakcích v různých percepčních úlohách a prostředích naznačují, že tyto interakce jsou spíše pravidlem než výjimkou při zpracování smyslových informací u člověka. [238-239]

5.1 Multisenzorická facilitace unisenzorického učení

Studie Seitz a spol. [234], porovnávala sluchově-vizuální a vizuální trénink pro percepční učení pomocí koherentní detekce pohybu a rozlišovacího úkolu. Ve srovnání vizuální (V) skupiny se sluchově-vizuální (AV) skupinou vykazovala sluchově-vizuální skupina lepší učení, jak během prvního sezení, tak i během deseti tréninkových sezení. Tyto dvě skupiny byly porovnány také ve studiích, které obsahovaly pouze vizuální signály a žádný zvukový signál, i zde byla výhoda multisenzorického tréninku zřejmá, jelikož snížila počet relací potřebných k dosažení asymptoty až o 60 % a zároveň se zvýšil maximální výkon.

Doplňující výsledky byly nalezeny ve studii sluchového rozpoznávání. Rozpoznávání hlasu bylo vylepšeno o audiovizuální školení (hlas společně s videem mluvící tváře) ve srovnání s tréninkem pouze zvukovým. Funkční konektivita mezi obličejovými (fusiformní oblast) a hlasovými oblastmi (temporální oblasti) se po tréninku zvýší a tyto asociativní reprezentace se následně staly dostupnými pro unisenzorické rozpoznávání. Což naznačuje, že multisenzorický trénink podporuje efektivnější získávání informací. Ačkoli tato zjištění pokrývají širokou škálu úrovní zpracování a mohou být zprostředkována různými mechanismy, zdá se, že multisenzorický přínos pro učení je zastřešujícím fenoménem. [17, 240]

5.1.1 Mechanismy multisenzorické facilitace

Multisenzorické posílení aktivity může mít několik podob, včetně zvýšení ratingu pálení (neuronů), resetování fáze probíhající oscilační aktivity, snížení latence odezvy a každý z těchto mechanismů může mít účinek zvýšení plasticity. [172, 242-245]

Klíčový rozdíl mezi unisenzorickým a multisenzorickým tréninkem nastává během kódování. Existuje několik možností ohledně toho, které struktury se během nastávajícího procesu učení změní.

V prvním rámci učení ovlivňuje stejné struktury a reprezentace, které procházejí modifikací pomocí klasického unisenzorického tréninku a výsledkem facilitace je, že pozdější prezentace unisenzorických podnětů povede k silnější aktivaci unisenzorických struktur.

V druhém rámci učení je zahrnuta změna spojení mezi modalitami neboli vznik multisenzorické reprezentace a pozdější prezentace unisenzorických podnětů aktivuje širší multismyslovou síť oblastí mozku. Alternativně může být facilitace vysvětlena multisenzorickou expozicí vedoucí k vytvoření nebo změně multisenzorické reprezentace, kterou pak může vyvolat unisenzorická komponenta. [246-247].

Další rámec popisuje práh neurální aktivace, který je nutno překonat k vyvolání nízkourovňové percepční učení. Tato teorie by předpovídala, že modulací aktivity ve vizuálních oblastech by zvuk mohl způsobit, že vizuální aktivace překročí práh, a tím usnadní vizuální učení (nebo naopak). Některé studie percepčního učení zjistily specifickou učení k primitivním smyslovým rysům (jako je prostorová lokalizace, úhel orientace nebo směry pohybu), což naznačuje, že učení probíhá v raných fázích smyslového zpracování viz výše v podkapitole 4.1.2. Význam sluchového podnětí vizuálního pohybového učení zapadá do tohoto rámce. Trénink vedl ke změnám citlivosti v jednoduchých úlohách detekce pohybu a bylo zjištěno, že jsou specifické pro trénovaný vizuální směr pohybu. [223, 231, 234, 241]

5.2 Význam kongruence

Ačkoli může být zvolen libovolný pár sluchového a vizuálního stimulu, zůstává otázkou, zda mají stimuly stejné posilující účinky na percepční učení. Odpověď však není úplně jednoznačná, i když trénink jakéhokoliv páru multisenzorických podnětů může vyvolat účinnější reprezentace jedno smyslového podnětu, účinky by mohly být podstatně výraznější u kongruentních podnětů.

Obecná definice kongruence zní takto, jedná se o vztah mezi podněty, které jsou v souladu s předchozí zkušeností jednotlivce, nebo vztahy mezi smysly nalezenými v přírodě. To zahrnuje základní atributy, jako je soulad v čase a prostoru, a navíc i funkce vyšší úrovně jako např. sémantický obsah (např. informace o objektu a řeči). Ačkoli některé z těchto vztahů mohou být fundamentálnější, než jiné je kongruence považována za celkovou funkci všech těchto vztahů. [17]

Například Kim a spol. [241] porovnávali učení ve třech skupinách, z nichž jedna trénovala s vizuální podnětem, který se pohyboval bez zvuku, druhá s kongruentními sluchově-vizuálními podnětem (pohybují se stejným směrem) a třetí s nekongruentními sluchově-vizuálními podněty (pohybují se v opačném směru). Zjistili, že facilitace je specifická pro kongruentní podmínku, a dospěli k závěru, že facilitace zahrnuje multisenzorické interakce (na rozdíl od informací relevantních pro úkol nebo obecného

upozorňujícího efektu vyvolaného zvukem), protože výsledky nelze snadno vysvětlit bez zvážení crossmodálních rysových vztahů.

Podobně to uvedli von Kriegstein a Giraud [240] i když se zlepšilo rozpoznávání vyzvánění mobilních telefonů po libovolném spárování s obrázkem mobilního telefonu, toto zlepšení bylo mnohem menší ve srovnání s hlasy spárovanými s tvářemi. Ačkoli je kongruence jasně důležitá pro učení, stojí za zmínku, že mnoho multisenzorických kongruencí může existovat pouze jako funkce naší zkušenosti. Například kongruence, jako je pes vydávající zvuk „haf“ a zvonek vydávající zvuk „cink“, jsou řízeny zkušenostmi. Vzhledem k tomu je možné, že pokud by výcvik pokračoval delší dobu, facilitace pomocí libovolného typu mobilního telefonu a vyzvánění by se mohla stát stejně účinná.

Nové důkazy skutečně naznačují, že své volné asociace mezi crossmodálními rysy lze zjistit u dospělých pozorovatelů, i když méně jasný je rozsah, v jakém může učení překonat vztahy, které v přírodě převládají, např. jako nekongruentní směry pohybu používané ve studii Seitzem a spol. [234].

5.3 Získávání nových multisenzorických asociací

Behaviorální studie u lidí ukazují, že nové multisenzorické asociace se mohou rozvíjet velmi rychle. Například Seitz a spol. [223] zjistili, že po 8minutové expozici rychlé sériové prezentaci sluchových a vizuálních podnětů se subjekty naučily identifikovat sluchově-vizuální „objekty“, které vykazovaly statistické pravidelnosti v sekvenci. Tento typ statistického učení je považován za základní proces formování nových objektů u kojenců ale i u dospělých [248]. V souvisejícím paradigmatu Kawahara a spol. [249] zjistili, že nové sluchově-vizuální kontexty se mohou lidské subjekty implicitně naučit.

Tanabe a spol. [250] zkoumali nervové substráty audiovizuálního párového asociálního učení pomocí funkčního zobrazování magnetickou rezonancí (fMRI) během zpožděného přiřazování vzorku k úloze (delayed matching to sample task). Jak učení postupovalo, zraková kortikální aktivita se zvyšovala během zpoždění poté, co byla prezentována sluchová složka páru, a naopak, horní temporální gyrus vykazoval větší aktivitu v reakci na vizuální složku páru s učením.

Zatímco tyto studie zkoumaly formování nových objektů na vysoké úrovni, několik studií ukázalo, že asociaci mezi libovolnými nízkourovňovými sluchovými a vizuálními a také vizuálními a haptickými rysy se lze naučit i v dospělosti. [251, 252]

5.4 Multisenzorická facilitace paměti

Výzkum paměti ukazuje, že multisenzorická expozice může vést k lepšímu rozpoznání objektů ve srovnání s unisenzorickou expozicí. Například bylo navrženo, že sluchově-vizuální sdužení může poskytnout vynikající paměťovou kapacitu. [253]

Podobně Lehman a Murray ve studii [254] nechali subjekty provést rozpoznávací úkol, ve kterém u každé prezentace stimulu uvedli, zda byl tento stimul prezentován již dříve. Podskupina těchto podnětů byla spárována se zvuky, které odpovídaly identitě obrazu (např. obrázek zvonku a „cink“). I když ve druhé prezentaci nebyl přítomen zvuk, zjistili, že obrázky, které byly předtím prezentovány s odpovídajícím zvukem, byly rozpoznány lépe než ty, které byly předtím prezentovány pouze vizuálně.

Stejně jako v případě percepčního učení má kongruence (zde sémantická kongruence) důležitou roli v multisenzorické facilitaci, kdy nekongruentní podněty (např. obrázek zvonku a zvuk „haf“) neusnadňovaly paměť. Výsledky tohoto druhu jsou v souladu s klasickou psychologickou představou „redintegrace“ (zpětná integrace), která se vztahuje k fenoménu, ve kterém je stav mysli obnoven z celku na prvky. [21, 255-257]

Studie [22, 28] naznačují, že multisenzorická expozice umožňuje zakódování stimulů do multisenzorických reprezentací, a tak později aktivuje větší síť mozkových oblastí než ty, které jsou vyvolány po unisenzorickém zakódování, a to může být základem pro facilitaci chování [254].

5.5 Metody multisenzorického učení

Výhodou multisenzorického tréninku je, že může zapojit jednotlivce s různými styly učení, někteří lidé jsou „vizuální studenti“ a jiní „sluchoví studenti“. Kromě toho je však multismyslový trénink na individuální úrovni prokazatelně efektivnější. [17]

Princip „dvojího kódování“ naznačuje, že informace vstupující do systému prostřednictvím více kanálů pro zpracování, pomáhají obejít omezené možnosti zpracování každého jednotlivého kanálu, a tak lze zpracovat větší celkovou informaci, když se šíří mezi více smysly. Související výzkumy ukazují, že multimodálním zpracováním se snižuje kognitivní zátěž, protože informace z různých modalit mohou být snadněji rozděleny do krátkodobé paměti, což se použije k vybudování dlouhodobých reprezentací. [41, 62]

„Kognitivní teorie multimediálního učení“ staví na této myšlence prostřednictvím studijních učebních materiálů. Animace, které jsou prezentovány společně s vyprávěním, usnadňují učení se faktům a konceptům. Předpokládá se, že zjištění učiněná v této oblasti

mohou mít důležité důsledky pro aplikace učení v reálném životě, a ne pouze na pár učebnicových situací. [17, 164, 258]

6 Vliv multisenzorických asociací na efektivitu pleoptické stimulace

Cílem pilotního výzkumu zkoumající vliv multisenzorických asociací na pleoptickou stimulaci je otestovat inovativní způsob cvičení amblyopického oka, který zahrnuje i podněcování dalšího smyslu, v tomto případě sluchu. A také odhalit, která z doprovodných audiostimulací bude mít větší efekt, jestli kongruentní (kdy zvuk odpovídá obrazu), či inkongruentní (zvuk je přehráván odzadu, neodpovídá obrazu). Na základě dosud publikovaných výsledků [234, 241] předpokládáme, že by kongruentní stimulace měla mít větší efekt.

Zrak podněcující část stimulace je založena na metodě CAM doplněné dalším vizuálním a zvukovým stimulem, které jsou buď v souladu (kongruentní) nebo v nesouladu (ingruentní). Stimul zahrnuje Dopplerův akustický efekt [61]. Efektivita stimulace byla měřena pomocí změny zrakové ostrosti. Vzhledem k předpokládaným malým změnám byla využita noniová zraková ostrost, aby byl patrný rozdíl po jednom cvičení, jelikož je tato metoda až 10x přesnější než metoda měření úhlové zrakové ostrosti [45-46].

6.1 Charakteristika výzkumného souboru

Výzkumu se účastnilo 65 probandů, z toho 40 chlapců a 25 dívek v průměrném věku 7,3 let se směrodatnou odchylkou 2,4 roky ve věkovém rozsahu od 4 do 14 let. Do studie bylo zařazeno celkem 71 očí, kdy byly sledovány pouze amblyopické oči (u 6 probandů byla oboustranná amblyopie, u ostatních pouze jednostranná). Ve všech případech se jednalo o pleopticky cvičící osoby ve věku od 4 do 15 let – tato skutečnost byla uvažována jako vstupní kritérium. Nedošlo k žádnému vyřazení účastníků.

Před cvičením byl rodiči (zákonnému zástupci) účastníčího se dítěte vysvětlen a popsán postup měření na noniové zrakové ostrosti a cvičení s inovovaným multisenzorickým CAMem. Všichni rodiče (zákonní zástupci) podepsali informovaný souhlas s dobrovolnou účastí svého dítěte na pilotním výzkumu v rámci diplomové práce s vědomím o anonymitě sběru dat a práva z výzkumu kdykoliv odstoupit bez udání důvodu.

6.2 Metody a průběh pilotního výzkumu

Praktická část pilotního výzkumu probíhala v Centru dětské oftalmologie BINOCULAR s.r.o. v Litomyšli. Účastníci výzkumu pravidelně navštěvují ortoopticko-pleoptickou cvičebnu v rámci terapie amblyopie.

Výzkum probíhal v rámci dvou pleoptických cvičení každého probanda realizovaných v rozmezí tří měsíců. Během jednoho pleoptického cvičení byla nejprve měřena noniová zraková ostrost (viz 6.2.1). Následovalo pasivní sledování multisenzorického stimulu prezentovaného na LCD televizoru. Vlastní stimul a jeho prezentace jsou popsány níže v 6.2.2. Stimul byl pozorován vždy monokulárně (amblyopickým okem) s nasazenou dioptrickou korekcí, pokud účastník korekci běžně nosil. Zvuk audiostimulace byl přenášen pomocí sluchátek. Zvukový záznam buďto odpovídal pohybu obrazu (tzv. kongruentní synergie), nebo byl přehráván od konce záznamu (tzv. inkongruentní synergie), kdy každý z nich byl prezentován na jednom cvičení s náhodně voleným pořadím. Po ukončení stimulace následovalo opětovné měření noniové zrakové ostrosti.

Obě měření noniové zrakové ostrosti v rámci jednoho cvičení trvaly v součtu asi 6 minut, následná multisenzorická stimulace trvala po dobu 9 minut (kdy 7 z nich byly promítány Gaborovy stimulační obrazce). V průběhu stimulace byla též zaznamenávána ztráta pozornosti (nesoustředěnost na stimul, komunikace během stimulace atp.). Dále byly zaznamenávány verbální spontánní emoční reakce na stimulaci (stimulace mě baví/nebaví, líbí se mi/nelíbí se mi, už bych na dané cvičení nechtěl atp.).

6.2.1 Noniové měření zrakové ostrosti

Noniový optotyp pracuje na principu koincidence, kdy se hodnotí minimální vzájemné posunutí nonia (dvou na sebe zdánlivě navazujících úseček), při kterém je tento posun ještě rozlišen. Noniová zraková ostrost byla měřena pomocí speciálního softwaru poskytnutého katedrou optiky. Prostřednictvím tohoto softwaru bylo na LCD monitoru FUJITSU B19-5 ECO 19 o rozlišení 1280x1024 px v jednom řádku zobrazeno 5 znaků, a to 4 stejné úsečky a jeden noniový znak o stejné výšce a šířce jako úsečky, pořadí všech těchto znaků na řádku bylo náhodné. Znaky byly černé na bílém pozadí o vysokém kontrastu ($> 0,9$). Příklad testových znaků je uveden na Obr. 10. Úhel na noniu bylo možné měnit s krokem $\log MAR = 0,025$. Úkolem účastníka bylo rozlišit noniový znak od ostatních úseček. Pětice znaků byla promítána pro danou velikost nonia vždy 5krát. Zraková ostrost byla stanovena na základě nejmenší úhlové velikosti nonia, při které

z uvedených pěti prezentací účastník nonius správně rozpoznal alespoň 3krát. Zraková ostrost byla měřena vždy monokuárně, s obvyklou korekcí, a to na vzdálenost 2,80 m za fotopických světelných podmínek.



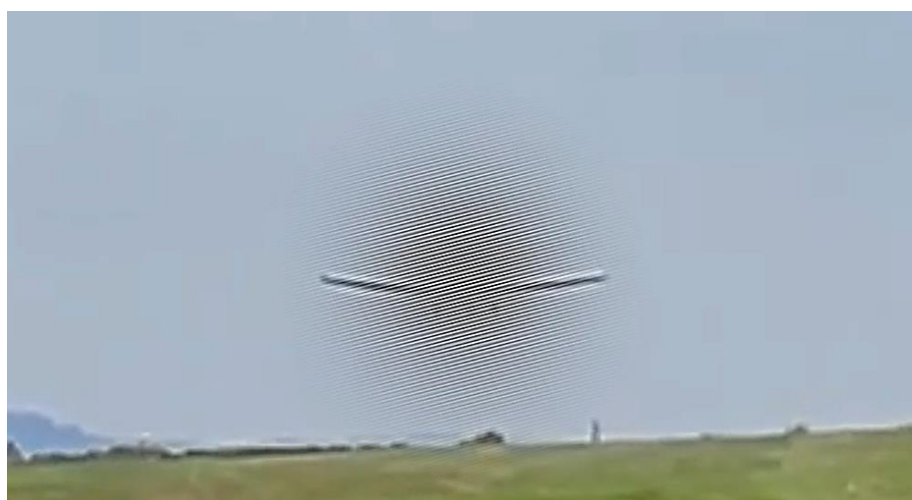
Obr. 10 Příklad promítaných znaků (v logMAR) noniového optotypu.

6.2.2 Multisenzorická stimulace

Pro studii byl vytvořen speciálním multisenzorický pleoptický stimul (viz Obr. 11), který je zkonstruován ze 6 terčů (po vzoru indického CAMU) s vysoce kontrastními pruhy ve formaci tzv. Gaborova obrazce o prostorové frekvenci od 10,71 do 173,08 cyklů na stupeň ($c/^{\circ}$). Velikost terče byla původně volena $26,5^{\circ}$, na této velikosti bylo otestováno 17 očí. Následně byla zvětšena na $36,9^{\circ}$ (otestováno 54 očí). Tyto terče byly promítány ve formě videa, přičemž se otáčely kolem svého středu a byly umístěny na místo vrtule letadla, které se pohybovalo směrem k pozorovateli (velikost terče se s přiblížením neměnila). Celé video obsahovalo několik cyklů, které končily odletem letadla. Ve fázi, kdy letadlo odlétalo, již nebyl přítomen stimulující terč. Celé video trvalo 9 min, z toho stimulační terč byl přítomen po celkovou dobu 7 min. Prostorová frekvence (tj. jednotlivé terče) se mezi cykly postupně měnila od nejmenší po největší. Tyto kontrastní terče byly pasivně sledovány ze vzdálenosti 50 cm na velkoplošném televizním monitoru LG Ultra HD 55“ o rozlišení 1920x1080 px.

Tento vizuální podnět byl v každém cyklu videa doplněn o synergní audiostimulaci zvuku letícího letadla, jež zahrnovala akustický Dopplerův efekt (efekt změny frekvence zvuku v závislosti na tom, zda se letadlo k pozorovateli přibližuje, nebo se od něj vzdaluje) a změnu hlasitosti související se změnou vzdálenosti letadla od pozorovatele. Zvukový záznam buďto odpovídá pohybu obrazu, tj. přibližování

letadla (tzv. kongruentní synergie), nebo je přehráván obráceně, tj. odpovídající vzdalování se letadla (tzv. inkongruentní synergie). Zvuk je přenášen pomocí sluchátek.



Obr. 11 Multisenzorický stimul s Gaborovými terči (příklad tří prostorových frekvencí).

6.3 Analýza dat

Normalita všech analyzovaných dat (v logMAR) byla testována pomocí Shapiro-Wilkova (S-W) testu. Pro srovnání dvojic dat v případě jejich normality byla použita metoda analýzy rozptylu (ANOVA) pro opakovaná měření, v opačném případě byl využit Wilcoxonův párový test.

Data před a po stimulaci byla v případě stimulace kongruentním zvukem a inkongruentním zvukem srovnávána vždy samostatně metodou ANOVA pro opakovaná měření. Dále byly spočítány rozdíly ve zrakové ostrosti před a po stimulaci. Rozdíly mezi jednotlivými podmínkami (kongruentní zvuk x inkongruentní zvuk) byly porovnány Wilcoxonovým párovým testem.

Vliv obou stimulačních podmínek na pozornost nebo emoční reakce subjektu byl vyhodnocen pomocí čtyřpolní kontingenční tabulky a chí-kvadrát testu. V tabulce byly souhrnně sledovány počty negativních emočních reakcí spolu se ztrátou pozornosti oproti situaci, kdy nedošlo k žádné změně či kdy byly emoční reakce pozitivní nebo došlo k velmi pozornému chování.

Statistické testy byly provedeny v programu STATISTICA 14 (TIBCO Software Inc.), a to vždy na hladině významnosti 0,05. V textu je též uvedena mezní hladina významnosti p , na které by právě došlo k zamítnutí testované hypotézy.

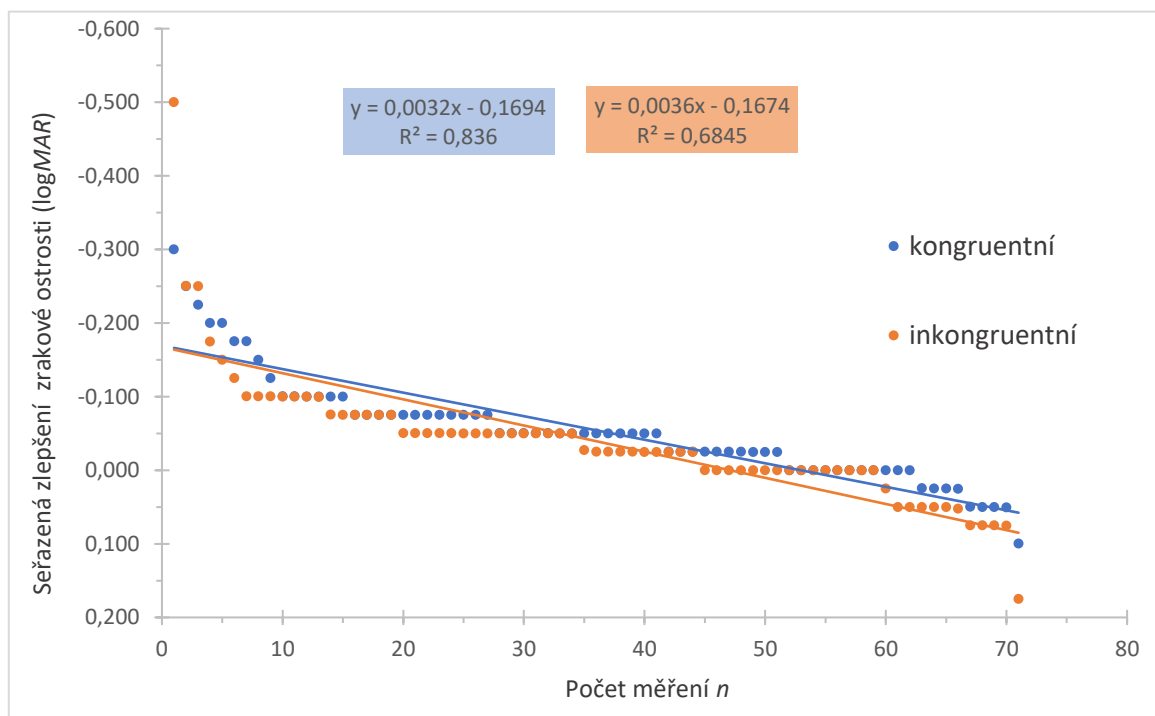
6.4 Výsledky

Hodnoty noniové zrakové ostrosti zjištěné v průběhu experimentu jsou ve formě průměrných hodnot, směrodatných odchylek, mediánů a 1. a 3. kvartilů uvedeny v Tab. 1. Dále tabulka uvádí změnu zrakové ostrosti zjištěnou po stimulaci (záporná hodnota poukazuje na zlepšení zrakové ostrosti). Z uvedených údajů vyplývá, že po stimulaci došlo v obou případech (kongruentní i inkongruentní stimul) ke zlepšení zrakové ostrosti.

Jednotlivá data, seřazená podle velikosti zlepšení zrakové ostrosti, jsou prezentována na Obr. 12. Z uvedených hodnot je patrný zřetelný nárůst zrakové ostrosti u většiny očí. Tyto výsledky též potvrdila statistická analýza metodou ANOVA, která zjistila signifikantní rozdíl mezi zrakovou ostrostití před a po stimulaci jak u kongruentního zvuku ($p < 0,0001$), tak u inkongruentního zvuku ($p = 0,0004$).

Tab. 1 Průměrné hodnoty, směrodatné odchylky (SD), mediány a 1. a 3. kvartily noniové zrakové ostrosti měřené bezprostředně před a po stimulaci a jejich rozdíly v případě kongruentního a inkongruentního zvuku.

Noniová zraková ostrost (logMAR)						
	Kongruentní zvuk			Inkongruentní zvuk		
	Před	Po	Zlepšení	Před	Po	Zlepšení
Průměr	0,11	0,5	-0,054	0,05	0,02	-0,039
SD	0,20	0,21	0,072	0,20	0,18	0,089
Medián	0,075	0,025	-0,050	0,025	0,000	-0,025
Kvartil 1.	-0,03	-0,09	-0,08	-0,05	-0,11	-0,08
Kvartil 3.	0,25	0,19	0,00	0,19	0,15	0,00

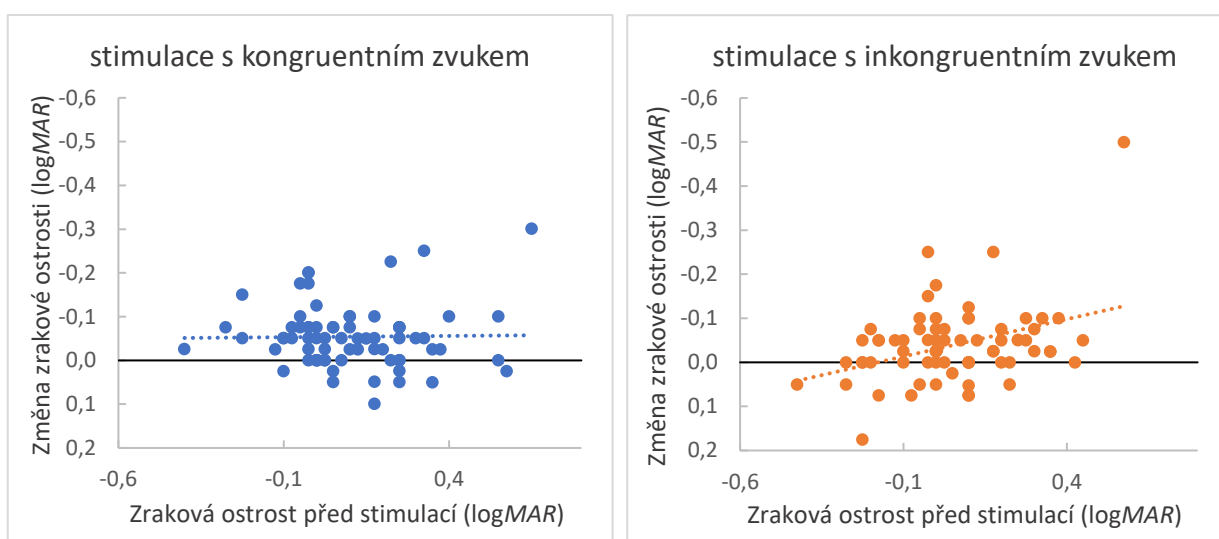


Obr. 12 Graf seřazeného zlepšení zrakové ostrosti (logMAR) podle velikosti v závislosti na počtu měření n . Data jednotlivých měření (kolečka) jsou proložena regresní přímkou (spojitá čára).

Dále byly Wilcoxonovým testem porovnávány hodnoty změny zrakové ostrosti v obou případech. Analýza neprokázala statisticky významný rozdíl mezi těmito hodnotami ($p = 0,06$). Výsledek je však nesignifikantní velmi těsně, u kongruentního zvuku data naznačují větší zlepšení zrakové ostrosti. Toto je naznačeno i na grafu na Obr. 12, kde lineární aproximace vykazuje mírnější pokles u kongruentního zvuku. Korelační analýza pomocí Spearmanova korelačního koeficientu ukázala, že v případě inkongruentního zvuku je zlepšení signifikantně závislé na počáteční zrakové

ostrosti ($r = -0,235$), přičemž lepších výsledků je dosaženo u nižší počáteční zrakové ostrosti. Oproti tomu u kongruentního zvuku nebyla tato závislost prokázána ($r = 0,155$). Tyto výsledky též demonstrují grafy na Obr. 13, kde jsou jednotlivá rozdílová data proložena přímkou (vlevo pro kongruentní zvuk, vpravo pro inkongruentní zvuk). Z proložených regresních přímek vyplývá, že stimulace kongruentním zvukem má v průměru stejný efekt bez ohledu na počáteční zrakovou ostrost.

Dále byl posouzen vliv pozornosti a emočních reakcí pomocí kontingenční tabulky, viz Tab. 2. Nebylo potvrzeno, že by se počet snížené pozornosti nebo negativních emočních reakcí významně lišil mezi jednotlivými podmínkami ($p = 0,20$).



Obr. 13 Závislost změny zrakové ostrosti po stimulaci na počáteční zrakové ostrosti v případě stimulace kongruentním (vlevo) a inkongruentním (vpravo) zvukem. Data jednotlivých měření (kolečka) jsou proložena regresní přímkou (tečkovaná čára).

Tab. 2 Kontingenční tabulka zachycující testovaný počet očí účastníků s negativní emoční reakcí nebo sníženou pozorností (N) oproti počtu těm, kdy nedošlo k negativní emoční změně během stimulaci nebo ke zhoršené pozornosti (P) při stimulaci kongruentním a inkongruentním zvukem.

	Kongruentní zvuk	Inkongruentní zvuk
P	65	60
N	6	11

6.5 Diskuze

Cílem pilotního výzkumu bylo zjistit, jaký vliv bude mít u inovovaného pleoptického stimulu přidaná kongruentní a inkongruentní audiostimulace. Z výsledků vyplývá, že u obou typů multisenzorické stimulace došlo ke zlepšení noniové zrakové ostrosti. Avšak mezi oběma typy stimulace byl jen malý, statisticky těsně nevýznamný rozdíl. Přitom data naznačují mírně větší zlepšení u stimulace s kongruentním zvukem. V případě subjektivní emoční a pozornostní odezvy probandů na stimulaci nebyl mezi oběma typy potvrzen žádný rozdíl.

Stávající studie vlivu multisenzorických asociací na různé typy stimulací zrakových funkcí potvrzují, že při kongruentní stimulaci je dosahováno lepších výsledků než v případě inkongruentních stimulací [148, 149, 150, 161, 162, 234, 241]. Práce [241] navíc udává, že v případě pouze vizuální stimulace je dosaženo ještě horších výsledků než u multisenzorických stimulů bez ohledu na kongruenci. Lepší výsledky u kongruentní stimulace uvádí též publikace [149, 150], využívající fMRI a MEG, kde byla vizuálním podnětem písmena (grafém) a zvukovým podnětem přečtení písmene (foném). Vyšší odezvu u kongruentních páru také potvrdila studie [161] využívající fMRI, kdy vizuálními podněty byly obrázky (zvířat, věcí atd.) a k nim odpovídající zvuky. Studie [162] využívající MEG také zaznamenala pozitivní vliv kongruence, a to při hudebním tréninku a zrakovém podnětu vytvořeném na podobném principu jako je hudební zápis.

V našem případě je patrný rozdíl mezi oběma typy stimulů pouze v tom, že kongruentní stimul vykazuje podobný efekt u všech počátečních hodnot vízu, zatímco dopad inkongruentního stimulu byl u velmi dobrých počátečních vizů nižší. Předešlé studie [149, 150, 161, 162, 234, 241] však nesledovaly přímo dopad stimulace na zrakovou ostrost, ale zaznamenávaly odezvu mozkové aktivity probandů nebo behaviorální efekt stimulace. První zmíněná metoda mohla být citlivější než sledování změn vízu. Typ kongruence stimulu má na zrakovou ostrost vliv, avšak u našeho měření vycházel pouze malý. Pro prokázání či vyvrácení rozdílů by bylo žádoucí experiment doplnit na větším počtu probandů.

Případný rozdíl mezi jednotlivými typy stimulace může být způsoben odlišnými emočními a pozornostními reakcemi. Studie [49, 241] skutečně potvrzují, že kongruentní stimul vykazuje lepší zapojení pozornosti než stimul inkongruentní. Naopak práce [138-140] zaměřené na emoční reakce vliv kongruence nepotvrdily, pokud se

nejednalo o extrémně silný negativní audiovizuální stimul. V naší práci jsme sledovali emoční a pozornostní odezvu společně, navíc pouze na základě verbální odpovědi dítěte, která nemusela vždy přesně vystihovat skutečný stav. Tato metodika může být příčinou toho, že nebyl potvrzen významný rozdíl v reakcích na jednotlivé stimuly.

Ze studia multisenzorických asociací vyplývá, že multisenzorická stimulace může být efektivnější než podobná unisenzorická stimulace. Což je však omezeno již existujícími kongruencemi přijímaných senzorických informací [17]. Dále je multisenzorická stimulace silně ovlivňována pozorností, emocemi a motivací, pro lepší představu o těchto vlivech by bylo vhodné v budoucím výzkumu použít jiné metody pro snímání reakcí než pouze pozorováním chování [14, 15]. Uvedené poznatky mají potenciál být převedeny do praxe ve snaze co nejvíce zefektivnit pleoptickou stimulaci, popř. léčbu dalších zrakových onemocnění.

Závěr

Multisenzorické asociace vznikají multisenzorickou integrací informací ze sensorických vstupů. Prostředí, ve kterém žijeme je plné multisenzorických podnětů, proto je důležité této skutečnosti vhodně přizpůsobit i příslušná zraková cvičení. Provedená rešerše stávajících publikací ukazuje, že zapojení více stimulů do jakéhokoliv typu cvičení skutečně pozitivně posiluje jeho žádoucí účinek. Tato práce se soustředila především na provázaný efekt zrakové a sluchové stimulace, a to hlavně v provedeném experimentu.

Pro experimentální část jsme zkonstruovali speciální stimul se sémantickým významem, který je běžně viděn v okolí. Jednalo se o video letícího letadla, zahrnující modifikovanou verzi CAM stimulatoru, doprovázeného odpovídajícím zvukem (kongruentní stimulace) nebo opačným zvukem (inkongruentní stimulace). V obou případech došlo ke zlepšení noniové zrakové ostrosti, rozdíly mezi jednotlivými typy stimulace však nebyly přímo potvrzeny. Nicméně některé aspekty výsledků naznačují, že vhodnější může být kongruentní stimulace, odpovídající přirozené situaci. Výraznější efekt kongruentní stimulace vyplývá též z dosavadních studií, které se ale nezaměřovaly přímo na zrakovou ostrost. Pro potvrzení rozdílů ve stimulacích bude třeba rozšířit skupinu probandů, popř. provést přímé srovnání s klasickým (unisenzorickým) stimulem. Předpokládaný dopad na pozornostní a emoční stav nebyl potvrzen, z literatury však vyplývá, že kongruentní stimulace by měla mít pozitivní dopad na pozornost, u emocí nebyl zjištěn její výrazný vliv, pokud podněty nebyly silně negativní.

Výzkum multisenzorických podnětů může významně přispět k doplnění znalostí jejich účinku na mozkové struktury. To může v budoucnu podstatně zefektivnit léčbu založenou na sensorické stimulaci včetně pleoptické a ortoptické léčby, která má značný dopad na kvalitu života.

Literatura

- [1] PLUHÁČEK, F. *Binokulární vidění: Poruchy BV a akomodace*. (přednáška) Olomouc: Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého, 2018
- [2] HROMÁDKOVÁ, L. *Šilhání*. Vyd. 3., nezměn. Brno: Národní centrum ošetrovatelství a nelékařských zdravotnických oborů, 2011. ISBN 978-80-7013-530-3.
- [3] BIRCH, E. E. *Amblyopia and binocular vision*. Progress in Retinal and Eye Research, vol. 33, 2013, pp. 67-84, DOI: 10.1016/j.preteyeres.2012.11.001
- [4] HUANG, J. C. *Neuroplasticity as a Proposed Mechanism for the Efficacy of Optometric Vision Therapy and Rehabilitation*. Journal of Behavioral Optometry, vol. 20, 2009, no. 4, pp. 95–99
- [5] WONG, A. M. F. *New concepts concerning the neural mechanisms of amblyopia and their clinical implications*. Canadian Journal of Ophthalmology, vol. 47, 2012, no. 5, pp. 399-409, DOI: 10.1016/j.jcjo.2012.05.002.
- [6] MCKEE, S. P., LEVI D. M., MOVSHON A. *The pattern of visual deficits in amblyopia*. Journal of Vision, vol. 3, 2003, no. 5, pp. 380-405, DOI: 10.1167/3.5.5
- [7] DOSTÁLEK, M., *KRBV pleoptika II.: rozvoj tupozrakého oka*. (přednáška) Brno: Lékařská fakulta, Masarykova Univerzita, 2020
- [8] FRANÇOISE, J. *Organisation fonctionnelle du cortex visuel primaire (aire VI)*. Plateforme – ACCES: Institut Français de l'Éducation, 2017
- [9] HUBEL, D. H., WIESEL T. N. *Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex*. The Journal of Physiology, vol. 160, 1962, no. 1, pp. 106-154, DOI: 10.1113/jphysiol.1962.sp006837
- [10] WURTZ, Robert H. *David H. Hubel 1926-2013: Bibliographical memories*. National Academy of Sciences, 2014
- [11] BONHOEFFER, T., GRINVALD A. *The layout of iso-orientation domains in area 18 of cat visual cortex: optical imaging reveals a pinwheel-like organization*. The Journal of Neuroscience, vol. 13, 1993, no. 10, pp. 4157-4180 DOI: 10.1523/JNEUROSCI.13-10-04157.1993

- [12] VARADYOVÁ, B. *Optimalizace aktivního screeningu amblyogenních refrakčních vad u dětí a stanovení nejvhodnější metodiky komplexní léčby amblyopie*. Brno: Masarykova univerzita, 2014
- [13] DOSTÁLEK, M., AUTRATA, R., BETLACHOVÁ P., KREJČÍŘOVÁ, I. *CAM a kam dál? Folia strabologica et neuroophthamologica: IV. – Trendy v dětské oftalmologii a strabologii*. Litomyšl: Supplementum I, 2014, pp. 18–20
- [14] DOSTÁLEK, M. *Ortoptika III: integrace VAS & senzo-motorika*. (přednáška) Brno: Lékařská fakulta, Masarykova univerzita, 2018
- [15] DOSTÁLEK, M. *Obecná fyziologie BV: analytická složka III. (fyziologická suprese)*. (přednáška) Brno: Lékařská fakulta, Masarykova univerzita, 2018
- [16] MORROW, E. M., ROFFMAN, J. L., WOLF D. H., COYLE, J. T. *Psychiatric Neuroscience: Incorporating Pathophysiology into Clinical Case Formulation*. Massachusetts General Hospital Comprehensive Clinical Psychiatry. Elsevier, 2008, pp. 543-564, ISBN 9780323047432. DOI: 10.1016/B978-0-323-04743-2.50042-1
- [17] SHAMS, L., SEITZ, A. R. *Benefits of multisensory learning*. Trends in Cognitive Sciences, vol. 12, 2008, no. 11, pp. 411-417, DOI: 10.1016/j.tics.2008.07.006
- [18] KRÁLÍČEK, P., HOUDEK, L., *Úvod do speciální neurofyziologie*. Praha: Galén, 2011, ISBN 978-80-7262-618-2.
- [19] BONHOEFFER, T., GRINVALD, A. *Iso-orientation domains in cat visual cortex are arranged in pinwheel-like patterns*. Nature, vol. 353, 1991, no. 6343, pp. 429-431, DOI:10.1038/353429a0
- [20] SENGPIEL, F. *Plasticity of the Visual Cortex and Treatment of Amblyopia*. Current Biology, vol. 24, 2014, no. 18, pp. 936-940, DOI: 10.1016/j.cub.2014.05.063
- [21] TULVING, E., MADIGAN, S. A. *Memory and Verbal Learning*. Annual Review of Psychology, vol. 21, 1970, no. 1, pp. 437-484, DOI: 10.1146/annurev.ps.21.020170.002253
- [22] MURRAY, M. M., MICHEL, C. M., GRAVE DE PERALTA, R., et al. *Rapid discrimination of visual and multisensory memories revealed by electrical*

neuroimaging. NeuroImage, vol. 21, 2004, no. 1, pp. 125-135, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2003.09.035

[23] ASTLE, A. T., WEBB, B. S., MCGRAW, P. V. *Spatial frequency discrimination learning in normal and developmentally impaired human vision*. Vision Research, vol. 50, 2010, no. 23, pp. 2445-2454, DOI: 10.1016/j.visres.2010.09.004

[24] HUSSAIN, Z., WEBB, B. S., ASTLE, A. T., MCGRAW P. V. *Perceptual Learning Reduces Crowding in Amblyopia and in the Normal Periphery*. Journal of Neuroscience, vol. 32, 2012, no. 2, pp. 474-480, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3845-11.2012

[25] GREEN, C.S., BAVELIER, D. *Learning, Attentional Control, and Action Video Games*. Current Biology, vol. 22, 2012, no. 6, pp. 197-206, DOI: 10.1016/j.cub.2012.02.012

[26] LI, R., POLAT, U., MAKOUS, W., BAVELIER, D. *Enhancing the contrast sensitivity function through action video game training*. Nature Neuroscience, vol. 12, 2009, no. 5, pp. 549-551, DOI:10.1038/nn.2296

[27] EASTGATE, R. M., GRIFFITHS, G. D., WADDINGHAM, P. E., et al. *Modified virtual reality technology for treatment of amblyopia*. Eye, vol. 20, 2006, no. 3, pp. 370-374, DOI: 10.1038/sj.eye.6701882

[28] MURRAY, M. M., FOXE, J. J., WYLIE, G. R. *The brain uses single-trial multisensory memories to discriminate without awareness*. NeuroImage, vol. 27, 2005, no. 2, pp. 473-478, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.04.016

[29] BAKER, D. H., MEESE, T. S., HESS, R. F. *Contrast masking in strabismic amblyopia: Attenuation, noise, interocular suppression and binocular summation*. Vision Research, vol. 48, 2008, no. 15, pp. 1625-1640, DOI: 10.1016/j.visres.2008.04.017

[30] Hess, R. F., Thompson, B., Black, J. M., Machara, G., Zhang, P., Bobier, W. R., Cooperstock, J. *An iPod treatment of amblyopia: an updated binocular approach*. Optometry, vol. 83. 2012, no. 2, pp. 87-94

[31] LI, J., THOMPSON, B., DENG, D., CHAN, L. Y. L., YU, M., HESS, R. F. *Dichoptic training enables the adult amblyopic brain to learn*. Current Biology, vol. 23, 2013, no. 8, pp. 308-309, DOI: 10.1016/j.cub.2013.01.059

- [32] ROSA, A. M., SILVA, M. F., FERREIRA, S., MURTA, J., CASTELO-BRANCO, M. *Plasticity in the Human Visual Cortex: An Ophthalmology-Based Perspective*. BioMed Research International, 2013, pp. 1-13, DOI: 10.1155/2013/568354
- [33] MUNDKUR, N. *Neuroplasticity in children*. The Indian Journal of Pediatrics, vol. 72, 2005, no. 10, pp. 855-857, DOI: 10.1007/BF02731115
- [34] KING, A. J. *Visual influences on auditory spatial learning*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol 364, 2009, no. 1515, pp. 331-339, DOI: 10.1098/rstb.2008.0230
- [35] NAVON, D. *Forest before trees: The precedence of global features in visual perception*. Cognitive Psychology, vol. 9, 1977, no. 3, pp. 353-383, DOI: 10.1016/0010-0285(77)90012-3
- [36] CONNOR, Ch. E., EGETH, H. E., YANTIS, S. *Visual Attention: Bottom-Up Versus Top-Down*. Current Biology, vol. 14, 2004, no. 19, pp. 850-852, DOI: 10.1016/j.cub.2004.09.041
- [37] CARRASCO, M. *Visual attention: The past 25 years*. Vision Research, vol. 51, 2011, no. 13, pp. 1484-1525, DOI: 10.1016/j.visres.2011.04.012
- [38] FRITZ, J. B., ELHILALI, M., DAVID, S. V., SHAMMA, S. A. *Auditory attention—focusing the searchlight on sound*. Current Opinion in Neurobiology, vol. 17, 2007, no. 4, pp. 437-455, DOI: 10.1016/j.conb.2007.07.011
- [39] PARASKEVOPOULOS, E., HERHOLZ, S. *Multisensory integration and neuroplasticity in the human cerebral cortex*. Translational Neuroscience, vol. 4, 2013, no. 3, DOI: 10.2478/s13380-013-0134-1
- [40] VAGGE, A, NELSON, L. B. *Amblyopia update*. Current Opinion in Ophthalmology, vol. 27, 2016, no. 5, pp. 380-386, DOI: 10.1097/ICU.0000000000000293
- [41] CLARK, J. M., PAIVIO, A. *Dual coding theory and education*. Educational Psychology Review, vol. 3, 1991, no. 3, pp. 149-210, DOI: 10.1007/BF01320076
- [42] PLHÁKOVÁ, A. *Učebnice obecné psychologie*. Praha: Academia, 2004. ISBN 80-200-1086-6.

- [43] STYLES, E. A. *Attention, Perception and Memory: An integrated introduction*. 1. New York: Routledge 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 4 RN, 2005. ISBN 0-86377-658-2-.
- [44] *Bottom-up vs. Top-down Processing*. OpenPSYC: A Free Resource for Introduction to Psychology [online]. United States: University of Maryland, 2014 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <http://openpsyc.blogspot.com/2014/06/bottom-up-vs-top-down-processing.html>
- [45] RUTRLE, M. *Brylová optika*. 2. přeprac. vyd. Brno: Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, 1993, ISBN 80-7013-145-4.
- [46] PLUHÁČEK, F. *Fyziologická optika: VII. Zraková ostrost a její měření*. (přednáška) Olomouc: Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého, 2017
- [47] POPPLE, A. V., LEVI, D. M. *The attentional blink in amblyopia*. Journal of Vision, vol. 8, 2008, no. 13, pp. 12-12, DOI: 10.1167/8.13.12
- [48] TRANEL, D., COOPER, G., RODNITZKY R. L. *Higher Brain Functions*. Neuroscience in Medicine. Totowa, NJ: Humana Press, 2003, pp. 621-639, ISBN 978-1-4757-5975-4. DOI: 10.1007/978-1-59259-371-2_29
- [49] HOCHERMAN, S., BENSON, D.A., GOLDSTEIN, M.H., HEFFNER, H.E., HIENZ, R. D. *Evoked unit activity in auditory cortex of monkeys performing a selective attention task*. Brain Research, vol. 117, 1976, no. 1, pp. 51-68, DOI: 10.1016/0006-52
- [51] NELSON, C. A. *Neural plasticity and human development: the role of early experience in sculpting memory systems*. Developmental Science, vol. 3, 2001, no. 2, pp. 115-136, DOI: 10.1111/1467-7687.00104.
- [52] BENEŠOVÁ, M., PREISS, M., KULIŠŤÁK, P. *Neuroplasticita lidského mozku a její význam pro psychologii*. Československá psychologie: časopis pro psychologickou teorii a praxi. Praha: Československá akademie věd, vol. 53, 2009, no. 1, pp. 55-67
- [53] SCHARTZ, J. M. *The Mind & The Brain: Neuroplasticity and the Power of Mental Force*. 2. New York: Harper Collins Publishers, 2003, ISBN 0060988479.
- [54] HENSCH, T. K., *Critical period plasticity in local cortical circuits*. Nature Reviews Neuroscience, vol. 6, 2005, no. 11, pp. 877-888, DOI: 10.1038/nrn1787.

- [55] ACHTMAN, R. L., GREEN, C. S., BAVELIER, D. *Video games as a tool to train visual skills*. Restor Neurol Neurosci, vol. 26, 2008, no. 4-5, pp. 435-446
- [56] LEVI, D. M. *Perceptual learning in adults with amblyopia: A reevaluation of critical periods in human vision*. Developmental Psychobiology, vol. 46, 2005, no. 3, pp. 222-232, DOI: 10.1002/dev.20050.
- [57] SABEL, B. A. *Editorial: Residual vision and plasticity after visual system damage*. Restorative Neurology and Neuroscience, vol. 15, 1999, no. 2-3, pp. 73-79
- [58] TAUB, E., USWATTE, G. *Constraint-Induced Movement therapy: Answers and questions after two decades of research*. NeuroRehabilitation, vol. 21, 2006, no. 2, pp. 93-95, DOI: 10.3233/NRE-2006-21201.
- [59] GERDES, A. B. M., WIESER, M. J., ALPERS, G. W. *Emotional pictures and sounds: a review of multimodal interactions of emotion cues in multiple domains*. Frontiers in Psychology, vol. 5, 2014, DOI: 10.3389/fpsyg.2014.01351
- [60] HUANG, J. C. *Neuroplasticity as a Proposed Mechanism for the Efficacy of Optometric Vision Therapy and Rehabilitation*. Journal of Behavioral Optometry, vol. 20, 2009, no. 4, pp. 95–99
- [61] OECHSLIN, M., NEUKOM, M., BENNETT, G. *The Doppler effect — an evolutionary critical cue for the perception of the direction of moving sound sources*. International Conference on Audio, Language and Image Processing. IEEE, 2008, pp. 676-679, ISBN 978-1-4244-1723-0. DOI: 10.1109/ICALIP.2008.4590253
- [62] BAGUI, S. *Reasons for increased learning using multimedia*. Journal of Educational Multimedia and Hypermedia, vol. 7, pp. 3-18
- [63] POGGIO, T., FAHLE, M., EDELMAN, S. *Fast perceptual learning in visual hyperacuity*. Science, vol. 256, 1992, no. 5059, pp. 1018-1021, DOI:10.1126/science.1589770
- [64] SAARINEN, J., LEVI, D. M. *Perceptual learning in vernier acuity: What is learned?* Vision Research, vol. 35, 1995, no. 4, pp. 519-527, DOI: 10.1016/0042-6989(94)00141-8
- [65] FIORENTINI, A., BERARDI, N. *Perceptual learning specific for orientation and spatial frequency*. Nature, vol. 287, 1980, no. 5777, pp. 43-44, DOI: 10.1038/287043a0

- [66] FINE, I., JACOBS, R. A. *Comparing perceptual learning across tasks: A review*. Journal of Vision, vol. 2, 2002, no. 2, pp. 5-5, DOI: 10.1167/2.2.5
- [67] SHIU, L., PASHLER, H. *Improvement in line orientation discrimination is retinally local but dependent on cognitive set*. Perception & Psychophysics, vol. 52, 1992, no. 5, pp. 582-588, DOI: 10.3758/BF03206720
- [68] O'TOOLE, A. J., KERSTEN, D. J. *Learning to See Random-Dot Stereograms*. Perception, vol. 21, 1992, vol. 2, pp. 227-243, DOI: doi:10.1068/p210227
- [69] HUANG, C., ZHOU, Y., LU, Z. *Broad bandwidth of perceptual learning in the visual system of adults with anisometric amblyopia*. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 105, 2008, no. 10, pp. 4068-4073, DOI: 10.1073/pnas.0800824105
- [70] ZHOU, Y., HUANG, C., XU, P., TAO, L., QIU, Z., LI, X., LU, Z. *Perceptual learning improves contrast sensitivity and visual acuity in adults with anisometric amblyopia*. Vision Research, vol. 46, 2006, no. 5, pp. 739-750, DOI: doi:10.1016/j.visres.2005.07.031
- [71] LEVI, D. M. *Perceptual learning in adults with amblyopia: A reevaluation of critical periods in human vision*. Developmental Psychobiology, vol. 46, 2005, no. 3, pp. 222-232, DOI: 10.1002/dev.20050
- [72] POLAT, U., MA-NAIM, T., BELKIN, M., SAGI, D. *Improving vision in adult amblyopia by perceptual learning*. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 101, 2004, no. 17, pp. 6692-6697, DOI: 10.1073/pnas.0401200101
- [73] LI, R. W., LEVI, D. M. *Characterizing the mechanisms of improvement for position discrimination in adult amblyopia*. Journal of Vision, vol. 4, 2004, no. 6, pp. 7-7, DOI: 10.1167/4.6.7
- [74] HUSSAIN, Z., WEBB, B. S., ASTLE, A. T., MCGRAW, P. V. *Perceptual Learning Reduces Crowding in Amblyopia and in the Normal Periphery*. Journal of Neuroscience, vol. 32, 2012, no. 2, pp. 474-480, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3845-11.2012
- [75] HOU, F., HUANG, C., TAO, L., FENG, L., ZHOU, Y., LU, Z. *Training in Contrast Detection Improves Motion Perception of Sinewave Gratings in Amblyopia*. Investigative Ophthalmology & Visual Science, vol. 52, 2011, no. 9, DOI: 10.1167/iovs.11-7541

- [76] LI, R. W., NGO, C., NGUYEN, J., LEVI, D. M., FAHLE, M. *Video-Game Play Induces Plasticity in the Visual System of Adults with Amblyopia*. PLoS Biology, vol. 9, 2011, no. 8, DOI:10.1371/journal.pbio.1001135
- [77] POLAT, U. *Improving Abnormal Spatial Vision in Adults with Amblyopia*. Seeing Spatial Form. Oxford University Press, 2005, pp. 370-384, ISBN 9780195172881. DOI:10.1093/acprof:oso/9780195172881.003.0018
- [78] CHEN, P., CHEN, J. T., FU, J. J., CHIEN, K. H., LU, D. W. *A pilot study of anisometric amblyopia improved in adults and children by perceptual learning: an alternative treatment to patching*. Ophthalmic and Physiological Optics, vol. 28, 2008, no. 5, pp. 422-428, DOI: 10.1111/j.1475-1313.2008.00588.x
- [79] LEVI, D. M., LI, R. W. *Improving the performance of the amblyopic visual system*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 364, 2009, no. 1515, pp. 399-407, DOI: 10.1098/rstb.2008.0203
- [80] LEVI, D. M., LI, R. W. *Perceptual learning as a potential treatment for amblyopia: A mini-review*. Vision Research, vol. 49, 2009, no. 21, pp. 2535-2549, DOI: 10.1016/j.visres.2009.02.010
- [81] HUANG, C. B., LU, Z. L., ZHOU, Y. *Mechanisms underlying perceptual learning of contrast detection in adults with anisometric amblyopia*. Journal of Vision, vol. 9, 2009, no. 11, pp. 24-24, DOI: 10.1167/9.11.24
- [82] LI, R. W, KLEIN, S. A., LEVI, D. M. *Prolonged Perceptual Learning of Positional Acuity in Adult Amblyopia: Perceptual Template Retuning Dynamics*. Journal of Neuroscience, vol. 28, 2008, no. 52, pp. 14223-14229, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4271-08.2008
- [83] YOTSUMOTO, Y., WATANABE, T., SASAKI, Y. *Different Dynamics of Performance and Brain Activation in the Time Course of Perceptual Learning*. Neuron, vol. 57, 2008, no. 6, pp. 827-833, DOI: 10.1016/j.neuron.2008.02.034
- [84] AHISSAR, M., HOCHSTEIN, S. *Attentional control of early perceptual learning*. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 90, 1993, no. 12, pp. 5718-5722, DOI: 10.1073/pnas.90.12.5718

- [85] FAHLE, M. *Perceptual learning: A case for early selection*. *Journal of Vision*, vol. 4, 2004, no. 10, DOI: 10.1167/4.10.4
- [86] EGETH, H. E., YANTIS, S. *VISUAL ATTENTION: Control, Representation, and Time Course*. *Annual Review of Psychology*, vol. 48, 1997, no. 1, pp. 269-297, DOI: 10.1146/annurev.psych.48.1.269
- [87] OGAWA, T., KOMATSU, H. *Target Selection in Area V4 during a Multidimensional Visual Search Task*. *Journal of Neuroscience*, vol. 24, 2004, no. 28, pp. 6371-6382, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0569-04.2004
- [88] MORAN, J., DESIMONE, R. *Selective Attention Gates Visual Processing in the Extrastriate Cortex*. *Science*, vol. 229, 1985, no. 4715, pp. 782-784, DOI: 10.1126/science.4023713
- [89] MOTTER, B. C. *Neural correlates of attentive selection for color or luminance in extrastriate area V4*. *The Journal of Neuroscience*, vol. 14, 1994, no. 4, pp. 2178-2189, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.14-04-02178.1994
- [90] CONNOR, C. E., PREDDIE, D. C., GALLANT, J. L., VAN ESSEN, D. C. *Spatial Attention Effects in Macaque Area V4*. *The Journal of Neuroscience*, vol. 17, 1997, no. 9, pp. 3201-3214, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.17-09-03201.1997
- [91] McADAMS, C. J., MAUNSELL, J. H. R. *Effects of Attention on Orientation-Tuning Functions of Single Neurons in Macaque Cortical Area V4*. *The Journal of Neuroscience*, vol. 19, 1999, no. 1, pp. 431-441, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.19-01-00431.1999
- [92] REYNOLDS, J. H., DESIMONE, R. *Interacting Roles of Attention and Visual Saliency in V4*. *Neuron*, vol. 37, 2003, no. 5, pp. 853-863, DOI: 10.1016/S0896-6273(03)00097-7
- [93] FAN, J., POSNER, M. *Human Attentional Networks*. *Psychiatrische Praxis*, vol. 31, 2004, pp. 210-214, DOI: 10.1055/s-2004-828484
- [94] AHVENINEN, J., JÄÄSKELÄINEN, I. P., RAIJ, T., et al. *Task-modulated "what" and "where" pathways in human auditory cortex*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 103, 2006, no. 39, pp. 14608-14613, DOI: 10.1073/pnas.0510480103

- [95] JOHNSON, J. A., ZATORRE, R. J. *Neural substrates for dividing and focusing attention between simultaneous auditory and visual events*. *NeuroImage*, vol. 31, 2006, no. 4, pp. 1673-1681, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2006.02.026
- [96] KASTNER, S., PINSK, M. A. *Visual attention as a multilevel selection process*. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, vol. 4, 2004, no. 4, pp. 483-500, DOI: 10.3758/CABN.4.4.483
- [97] KNUDSEN, E. I. *Fundamental Components of Attention*. *Annual Review of Neuroscience*, vol. 30, 2007, no. 1, pp. 57-78, DOI: 10.1146/annurev.neuro.30.051606.094256
- [98] KAYSER, C., PETKOV, C. I., LIPPERT, M., LOGOTHETIS, N. K. *Mechanisms for Allocating Auditory Attention: An Auditory Saliency Map*. *Current Biology*, vol. 15, 2005, no. 21, pp. 1943-1947, DOI: 10.1016/j.cub.2005.09.040
- [99] HUBEL, D. H., HENSON, C. O., RUPERT, A., GALAMBOS, R. *"Attention" Units in the Auditory Cortex*. *Science*, vol. 129, 1959, no. 3358, pp. 1279-1280, DOI: 10.1126/science.129.3358.1279
- [100] GILBERT, Ch. D., SIGMAN, M. *Brain States: Top-Down Influences in Sensory Processing*. *Neuron*, vol. 54, 2007, no. 5, pp. 677-696, DOI: 10.1016/j.neuron.2007.05.019
- [101] FRITZ, J., SHAMMA, S., ELHILALI, M., KLEIN, D. *Rapid task-related plasticity of spectrotemporal receptive fields in primary auditory cortex*. *Nature Neuroscience*, vol. 6, 2003, no. 11, pp. 1216-1223, DOI: 10.1038/nn1141
- [102] FRITZ, J. B. *Differential Dynamic Plasticity of A1 Receptive Fields during Multiple Spectral Tasks*. *Journal of Neuroscience*, vol. 25, 2005, no. 33, pp. 7623-7635, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1318-05.2005
- [103] VOGEL, E. K., WOODMAN, G. F., LUCK, S. J. *Pushing around the Locus of Selection: Evidence for the Flexible-selection Hypothesis*. *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 17, 2005, no. 12, pp. 1907-1922, DOI: 10.1162/089892905775008599
- [104] POSNER, M. I., PETERSEN, S. E. *The Attention System of the Human Brain*. *Annual Review of Neuroscience*, vol. 13, 1990, no. 1, pp. 25-42, DOI: 10.1146/annurev.ne.13.030190.000325

- [105] SHOMSTEIN, S. *Parietal Cortex Mediates Voluntary Control of Spatial and Nonspatial Auditory Attention*. Journal of Neuroscience, vol. 26, 2006, no. 2, pp. 435-439, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4408-05.2006
- [106] MAYER, A. R., HARRINGTON, D., ADAIR, J. C., LEE, R. *The neural networks underlying endogenous auditory covert orienting and reorienting*. NeuroImage, vol. 30, 2006, no. 3, pp. 938-949, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.10.050
- [107] SHOMSTEIN, S. *Control of Attention Shifts between Vision and Audition in Human Cortex*. Journal of Neuroscience, vol. 24, 2004, no. 47, pp. 10702-10706, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2939-04.2004
- [108] SRIDHARAN, D., LEVITIN, D. J., CHAFE, C. H., BERGER, J., MENON, V. *Neural Dynamics of Event Segmentation in Music: Converging Evidence for Dissociable Ventral and Dorsal Networks*. Neuron, vol. 55, 2007, no. 3, pp. 521-532, DOI: 10.1016/j.neuron.2007.07.003
- [109] KAYSER, C., PETKOV, C. I., AUGATH, M., LOGOTHETIS N. K. *Functional Imaging Reveals Visual Modulation of Specific Fields in Auditory Cortex*. Journal of Neuroscience, vol. 27, 2007, no. 8, pp. 1824-1835, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4737-06.2007
- [110] GHAZANFAR, A., SCHROEDER, C. *Is neocortex essentially multisensory?* Trends in Cognitive Sciences, vol. 10, 2006, no. 6, pp. 278-285, DOI: 10.1016/j.tics.2006.04.008
- [111] DOSTÁLEK, M., AUTRATA, R., ŘEHŮŘEK, J., PETRIŠČÁKOVÁ, M., BETLACHOVÁ P. *DRUHÝ LEVELTŮV ZÁKON*. Folia strabologica et neuroophthamologica: XI. – Symposium dětské oftalmologie. Litomyšl: Supplementum I, 2013, pp. 24-30
- [112] WOODRUFF, P. W., RANDALL R., BENSON, R. R., BANDETTINI, P. A., KWONG, K. K., HOWARD, R. J., TALAVAGE, T., BELLIVEAU, J., ROSEN, B. R. *Modulation of auditory and visual cortex by selective attention is modality-dependent*. NeuroReport, vol. 7, 1996, no. 12, pp. 1909-1913, DOI: 10.1097/00001756-199608120-00007

- [113] ZATORRE, R. J., MONDOR, T. A., EVANS, A. C. *Auditory Attention to Space and Frequency Activates Similar Cerebral Systems*. *NeuroImage*, vol. 10, 1999, no. 5, pp. 544-554, DOI: 10.1006/nimg.1999.0491
- [114] LAURIENTI, P. J., BURDETTE, J. H., WALLACE, M. T., YEN, Y. F., FIELD, A. S., STEIN, B. E. *Deactivation of Sensory-Specific Cortex by Cross-Modal Stimuli*. *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 14, 2002, no. 3, pp. 420-429, DOI: 10.1162/089892902317361930
- [115] PETKOV, C. I, KANG, X., ALHO, K., BERTRAND, O., YUND, E. W., WOODS, D. L. *Attentional modulation of human auditory cortex*. *Nature Neuroscience*, vol. 7, 2004, no. 6, pp. 658-663, DOI: 10.1038/nn1256
- [116] SHOMSTEIN, S. *Control of Attention Shifts between Vision and Audition in Human Cortex*. *Journal of Neuroscience*, vol. 24, 2004, no. 47, pp. 10702-10706, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2939-04.2004
- [117] SHULMAN, G. *Top-down modulation of early sensory cortex*. *Cerebral Cortex*, vol. 7, no. 3, pp. 193-206, DOI: 10.1093/cercor/7.3.193
- [118] DOWNAR, J., CRAWLEY, A. P., MIKULIS, D. J., DAVIS, K. D. *The Effect of Task Relevance on the Cortical Response to Changes in Visual and Auditory Stimuli: An Event-Related fMRI Study*. *NeuroImage*, vol. 14, 2001, no. 6, pp. 1256-1267, DOI: 10.1006/nimg.2001.0946
- [119] JOHNSON, J. A., ZATORRE, J. R. *Attention to Simultaneous Unrelated Auditory and Visual Events: Behavioral and Neural Correlates*. *Cerebral Cortex*, vol. 15, 2005, no. 10, pp. 1609-1620, DOI: 10.1093/cercor/bhi039
- [120] JOHNSON, J. A., STRAFELLA, A. P., ZATORRE, R. J. *The Role of the Dorsolateral Prefrontal Cortex in Bimodal Divided Attention: Two Transcranial Magnetic Stimulation Studies*. *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 19, 2007, no. 6, pp. 907-920, DOI: 10.1162/jocn.2007.19.6.907
- [121] ALAIS, D., MORRONE, C., BURR, D. *Separate attentional resources for vision and audition*. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 273, 2006, no. 1592, pp. 1339-1345, DOI: 10.1098/rspb.2005.3420

- [122] TALSMAN, D., DOTY, T. J., WOLDORFF, M. G. *Selective Attention and Audiovisual Integration: Is Attending to Both Modalities a Prerequisite for Early Integration?* Cerebral Cortex, vol. 17, 2006, no. 3, pp. 679-690, DOI: 10.1093/cercor/bhk016
- [123] DEGERMAN, A., RINNE, T., PEKKOLA, J., AUTTI, T., JÄÄSKELÄINEN, I. P., SAMS, M., ALHO, K. *Human brain activity associated with audiovisual perception and attention.* NeuroImage, vol. 34, 2007, no. 4, pp. 1683-1691, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2006.11.019
- [124] KIDD, G., ARBOGAST, T. L., MASON, C. R., GALLUN, F. J. *The advantage of knowing where to listen.* The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 118, 2005, no. 6, pp. 3804-3815, DOI: :10.1121/1.2109187
- [125] RAHNE, T., BÖCKMANN, M., VON SPECHT, H., SUSSMAN, E. S., *Visual cues can modulate integration and segregation of objects in auditory scene analysis.* Brain Research, vol. 1144, 2007, pp. 127-135, DOI :10.1016/j.brainres.2007.01.074
- [126] BIDEET-CAULET, A., VOISIN, J., BERTRAND, O., FONLUPT, P. *Listening to a walking human activates the temporal biological motion area.* NeuroImage, vol. 28, 2005, no. 1, pp. 132-139, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.06.018
- [127] METZGER, R. R., GREENE, N. T., PORTER K. K., GROH, J. M. *Effects of Reward and Behavioral Context on Neural Activity in the Primate Inferior Colliculus.* Journal of Neuroscience, vol. 26, 2006, no. 28, pp. 7468-7476, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5401-05.2006
- [128] CALVERT, G. A., BULLMORE, E. T., BRAMMER, M. J., et al. *Activation of Auditory Cortex During Silent Lipreading.* Science, vol 276, 1997, no. 5312, pp. 593-596, DOI: 10.1126/science.276.5312.593
- [129] PEKKOLA, J., OJANEN, V., AUTTI, T., JAASKELAINEN, I. P., MOTTONEN, R., TARKIAINEN, A., SAMS, M. *Primary auditory cortex activation by visual speech: an fMRI study at 3T.* NeuroReport, vol. 16, 2005, no. 2, pp 125-128, DOI: 10.1097/00001756-200502080-00010
- [130] PEKKOLA, J., OJANEN, V., AUTTI, T., JAASKELAINEN, I. P., MOTTONEN, R., TARKIAINEN, A., SAMS, M. *Attention to visual speech gestures enhances*

hemodynamic activity in the left planum temporale. Human Brain Mapping, vol. 27, 2006, no. 6, pp. 471-477, DOI: 10.1002/hbm.20190

[131] BEST, V., OZMERAL, E. J., SHINN-CUNNINGHAM, B. G. *Visually-guided Attention Enhances Target Identification in a Complex Auditory Scene*. Journal of the Association for Research in Otolaryngology, vol. 8 2007, no. 2, pp. 294-304, DOI: 10.1007/s10162-007-0073-z

[132] SELEZNEVA, E., SCHEICH, H., BROSCHE, M. *Dual Time Scales for Categorical Decision Making in Auditory Cortex*. Current Biology, vol. 16, 2006, no. 24, pp. 2428-2433, DOI: 10.1016/j.cub.2006.10.027

[133] WU, C.T., WEISSMAN, D. H., ROBERTS, K. C., WOLDORFF, M. G. *The neural circuitry underlying the executive control of auditory spatial attention*. Brain Research, vol. 1134, 2007, pp. 187-198, DOI: 10.1016/j.brainres.2006.11.088

[134] BRADLEY, M. M., LANG, P. J. *Affective reactions to acoustic stimuli*. Psychophysiology, vol. 37, 2000, no. 2, pp. 204-215, DOI: 10.1111/1469-8986.3720204

[135] SCHUPP, H. T., JUNGHÖFER, M., WEIKE, A. I., HAMM, A. O. *Attention and emotion: an ERP analysis of facilitated emotional stimulus processing*. NeuroReport, vol. 14, 2003, no. 8, pp. 1107-1110, DOI: 10.1097/00001756-200306110-00002

[136] CZIGLER, I., COX, T. J., GYIMESI, K., HORVÁTH, J. *Event-related potential study to aversive auditory stimuli*. Neuroscience Letters, vol. 420, 2007, no. 3, pp. 251-256, DOI: 10.1016/j.neulet.2007.05.007

[137] THIERRY, G., ROBERTS, M. V. *Event-related potential study of attention capture by affective sounds*. NeuroReport, vol. 18, 2007, no. 3, pp. 245-248, DOI: 10.1097/WNR.0b013e328011dc95

[138] COX, T. J. *The effect of visual stimuli on the horribleness of awful sounds*. Applied Acoustics, vol. 69, 2008, no. 8, pp. 691-703, DOI: 10.1016/j.apacoust.2007.02.010

[139] BROUWER, A.-M., VAN WOUWE, N., MÜHL, C., VAN ERP, J., TOET, A. *Perceiving blocks of emotional pictures and sounds: effects on physiological variables*. Frontiers in Human Neuroscience, vol. 7, 2013, DOI: 10.3389/fnhum.2013.00295

- [140] GERDES, A. B. M., WIESER, M. J., BUBLATZKY, F., KUSAY, A., PLICHTA, M. M., ALPERS, G. W. *Emotional sounds modulate early neural processing of emotional pictures*. *Frontiers in Psychology*, vol. 4, 2013, DOI: 10.3389/fpsyg.2013.00741
- [141] GHAZANFAR, A., SCHROEDER, C. *Is neocortex essentially multisensory?* *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 10, 2006, no. 6, pp. 278-285, DOI: 10.1016/j.tics.2006.04.008
- [142] DRIVER, J., NOESSELT, T. *Multisensory Interplay Reveals Crossmodal Influences on 'Sensory-Specific' Brain Regions, Neural Responses, and Judgments*. *Neuron*, vol. 57, 2008, no. 1, pp. 11-23, DOI: 10.1016/j.neuron.2007.12.013
- [143] ZATORRE, R. J., FIELDS, R. J., JOHANSEN-BERG, H. *Plasticity in gray and white: neuroimaging changes in brain structure during learning*. *Nature Neuroscience*, vol. 15, 2012, no. 4, pp. 528-536, DOI: 10.1038/nn.3045
- [144] MAGUIRE, E. A., GADIAN, D. G., JOHNSRUDE, I. S., GOOD, C. D., ASHBURNER, J., FRACKOWIAK, R. S. J., FRITH, C. D. *Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 97, 2000, no. 8, pp. 4398-4403, DOI: 10.1073/pnas.070039597
- [145] BENGTSSON, S. L., NAGY, Z., SKARE, S., FORSMAN, L., FORSSBERG, H., ULLÉN, F. *Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development*. *Nature Neuroscience*, vol. 8, 2005, no. 9, pp. 1148-1150, DOI: 10.1038/nn1516
- [146] WAN, C. Y., SCHLAUG, G. *Music Making as a Tool for Promoting Brain Plasticity across the Life Span*. *The Neuroscientist*, vol. 16, 2010, no. 5, pp. 566-577, DOI: 10.1177/1073858410377805
- [147] CAPPE, C., ROUILLER, E. M., BARONE, P. *Multisensory anatomical pathways*. *Hearing Research*, vol. 258, 2009, no. 1-2, pp. 28-36, DOI: 10.1016/j.heares.2009.04.017
- [148] WRIGHT, T. M. *Polysensory Interactions along Lateral Temporal Regions Evoked by Audiovisual Speech*. *Cerebral Cortex*, vol. 13, 2003, no. 10, pp. 1034-1043, DOI: 10.1093/cercor/13.10.1034

- [149] VAN ATTEVELDT, N., FORMISANO, E., GOEBEL, R., BLOMERT, L. *Integration of Letters and Speech Sounds in the Human Brain*. *Neuron*, vol. 43, 2004, no. 2, pp. 271-282, DOI: 10.1016/j.neuron.2004.06.025
- [150] RAIJ, T., UUTELA, K., HARI, R. *Audiovisual Integration of Letters in the Human Brain*. *Neuron*, vol. 28, 2000, no. 2, pp. 617-625, DOI:10.1016/S0896-6273(00)00138-0
- [151] BARRACLOUGH, N. E., XIAO, D., BAKER, C. I., ORAM, M. W., PERRETT, D. I., *Integration of Visual and Auditory Information by Superior Temporal Sulcus Neurons Responsive to the Sight of Actions*. *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 17, 2005, no. 3, pp. 377-391, DOI: 10.1162/0898929053279586
- [152] MACALUSO, E., DRIVER, J. *Multisensory spatial interactions: a window onto functional integration in the human brain*. *Trends in Neurosciences*, vol. 28, 2005, no. 5, pp. 264-271, DOI: 10.1016/j.tins.2005.03.008
- [153] BREMMER, F., SCHLACK, A., SHAH, N. J., ZAFIRIS, O., KUBISCHIK, M., HOFFMANN, K.-P., ZILLES, K., FINK, G. R. *Polymodal Motion Processing in Posterior Parietal and Premotor Cortex*. *Neuron*, vol. 29, 2001, no. 1, pp. 287-296, DOI: 10.1016/S0896-6273(01)00198-2
- [154] MAKIN, T. R., HOLMES, N. P., ZOHARY, E. *Is That Near My Hand? Multisensory Representation of Peripersonal Space in Human Intraparietal Sulcus*. *Journal of Neuroscience*, vol. 27, 2007, no. 4, pp. 731-740, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3653-06.2007
- [155] GIFFORD, G. W., COHEN, Y. E. *Spatial and non-spatial auditory processing in the lateral intraparietal area*. *Experimental Brain Research*, vol. 162, 2005, no. 4, pp. 509-512, DOI: 10.1007/s00221-005-2220-2
- [156] GRUNEWALD, A., LINDEN, J. F., ANDERSEN, R. A. *Responses to Auditory Stimuli in Macaque Lateral Intraparietal Area I. Effects of Training*. *Journal of Neurophysiology*, vol. 82, 1999, no. 1, pp. 330-342, DOI: 10.1152/jn.1999.82.1.330
- [157] GIFFORD, G. W., COHEN, Y. E. *Effect of a Central Fixation Light on Auditory Spatial Responses in Area LIP*. *Journal of Neurophysiology*, vol. 91, 2004, no. 6, pp. 2929-2933, DOI: 10.1152/jn.01117.2003

- [158] BEAUCHAMP, M. S. *See me, hear me, touch me: multisensory integration in lateral occipital-temporal cortex*. *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 15, 2005, no. 2, pp. 145-153, DOI: 10.1016/j.conb.2005.03.011
- [159] FUSTER, J. M., BODNER, M., KROGER, J. K. *Cross-modal and cross-temporal association in neurons of frontal cortex*. *Nature*, vol. 405, 2000, no. 6784, pp. 347-351, DOI: 10.1038/35012613
- [160] NOPPENY, U., OSTWALD, D., WERNER, S. *Perceptual Decisions Formed by Accumulation of Audiovisual Evidence in Prefrontal Cortex*. *Journal of Neuroscience*, vol. 30, 2010, no. 21, pp. 7434-7446, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0455-10.2010
- [161] BELARDINELLI, M. O., SESTIERI, C., DI MATTEO, R., et al. *Audio-visual crossmodal interactions in environmental perception: an fMRI investigation*. *Cognitive Processing*, vol. 5, 2004, no. 3, pp. 167-174, DOI: 10.1007/s10339-004-0024-0
- [162] PARASKEVOPOULOS, E., KUCHENBUCH, A., HERHOLZ S. C., PANTEV, C. *Musical Expertise Induces Audiovisual Integration of Abstract Congruency Rules*. *Journal of Neuroscience*, vol. 32, 2012, no. 50, pp. 18196-18203, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1947-12.2012
- [163] KAYSER, C., PETKOV, C. I., LOGOTHETIS, N. K. *Multisensory interactions in primate auditory cortex: fMRI and electrophysiology*. *Hearing Research*, vol. 258, 2009, no. 1-2, pp. 80-88, DOI: 10.1016/j.heares.2009.02.011
- [164] MAYER, R. E., HEISER, J., LONN, S. *Cognitive constraints on multimedia learning: When presenting more material results in less understanding*. *Journal of Educational Psychology*, vol. 93, 2001, no. 1, pp. 187-198, DOI: 10.1037/0022-0663.93.1.187
- [165] HOEFER, M., TYLL, S., KANOWSKI, M., et al. *Tactile stimulation and hemispheric asymmetries modulate auditory perception and neural responses in primary auditory cortex*. *NeuroImage*, vol. 79, 2013, pp. 371-382, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.04.119
- [166] MIKI, K., WATANABE, S., KAKIGI, R. *Interaction between auditory and visual stimulus relating to the vowel sounds in the auditory cortex in humans: a magnetoencephalographic study*. *Neuroscience Letters*, vol. 357, 2004, no. 3, pp. 199-202, DOI: 10.1016/j.neulet.2003.12.082

- [167] LÜTKENHÖNER, B., LAMMERTMANN, C., SIMÕES, C., HARI, R. *Magnetoencephalographic Correlates of Audiotactile Interaction*. *NeuroImage*, vol. 15, 2002, no. 3, pp. 509-522, DOI: 10.1006/nimg.2001.0991
- [168] WATKINS, S., SHAMS, L., TANAKA, S., et al. *Sound alters activity in human V1 in association with illusory visual perception*. *NeuroImage*, vol. 31, 2006, no. 3, pp. 1247-1256, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2006.01.016
- [169] TETTAMANTI, M., WENIGER, D. *Broca's Area: a Supramodal Hierarchical Processor?* *Cortex*, vol. 42, 2006, no. 4, pp. 491-494, DOI: 10.1016/S0010-9452(08)70384-8
- [170] EGER, E., STERZER, P., RUSS, M. O. et al. *A Supramodal Number Representation in Human Intraparietal Cortex*. *Neuron*, vol. 37, 2003, no. 4, pp. 719-726, DOI: 10.1016/S0896-6273(03)00036-9
- [171] ROBERTS, K. L., HALL, D. A. *Examining a Supramodal Network for Conflict Processing: A Systematic Review and Novel Functional Magnetic Resonance Imaging Data for Related Visual and Auditory Stroop Tasks*. *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 20, 2008, no. 6, pp. 1063-1078, DOI:10.1162/jocn.2008.20074
- [172] STEIN, B. E., MEREDITH, M. A. *The Merging of the Senses*. MIT Press, Cambridge, MA, Cognitive Neuroscience Series, vol. 261, 1993, no. 5123, pp. 928-929, DOI: 10.1126/science.261.5123.928
- [173] MEREDITH, M. A., STEIN, B. E. *Spatial factors determine the activity of multisensory neurons in cat superior colliculus*. *Brain Research*, vol. 1986, no. 2, pp. 350-354, DOI: 10.1016/0006-8993(86)91648-3
- [174] JIANG, W., WALLACE, M. T., JIANG, H., et al. *Two Cortical Areas Mediate Multisensory Integration in Superior Colliculus Neurons*. *Journal of Neurophysiology*, vol. 85, 2001, no. 2, pp. 506-522, DOI: 10.1152/jn.2001.85.2.506
- [175] NAGHAVI, H. R., ERIKSSON, J., LARSSON, A., NYBERG, L. *The claustrum/insula region integrates conceptually related sounds and pictures*. *Neuroscience Letters*, vol. 422, 2007, no. 1, pp. 77-80, DOI: 10.1016/j.neulet.2007.06.009

- [176] CHUDLER, E. H., SUGIYAMA, K., DONG, W, K. *Multisensory convergence and integration in the neostriatum and globus pallidus of the rat*. Brain Research, vol. 674, 1995, no. 1, pp. 33-45, DOI: 10.1016/0006-8993(94)01427-J
- [177] KURAOKA, K., NAKAMURA, K. *Responses of Single Neurons in Monkey Amygdala to Facial and Vocal Emotions*. Journal of Neurophysiology, vol. 97, 2007, no. 2, pp. 1379-1387, DOI: 10.1152/jn.00464.2006
- [178] KOMURA, Y., TAMURA, R., UWANO, T. et al. *Auditory thalamus integrates visual inputs into behavioral gains*. Nature Neuroscience, vol. 8, 2005, no. 9, pp. 1203-1209, DOI: 10.1038/nm1528
- [179] BASURA, G. J., KOEHLER, S. D., SHORE, S. E. *Multi-sensory integration in brainstem and auditory cortex*. Brain Research, vol. 1485, 2012, no. 95-107, DOI: 10.1016/j.brainres.2012.08.037
- [180] MUSACCHIA, G., SAMS, M., NICOL, T., KRAUS, N. *Seeing speech affects acoustic information processing in the human brainstem*. Experimental Brain Research, vol. 168, 2006, no. 1-2, pp. 1-10, DOI: 10.1007/s00221-005-0071-5
- [181] SENKOWSKI, D., SCHNEIDER, T. R., FOXE, J. J., ENGEL, A. K. *Crossmodal binding through neural coherence: implications for multisensory processing*. Trends in Neurosciences, vol. 31, 2008, no. 8, pp. 401-409, DOI: 10.1016/j.tins.2008.05.002
- [182] SENKOWSKI, D., et al. *Oscillatory Beta Activity Predicts Response Speed during a Multisensory Audiovisual Reaction Time Task: A High-Density Electrical Mapping Study*. Cerebral Cortex, vol. 16, 2005, no. 11, pp. 1556-1565, DOI: 10.1093/cercor/bhj091
- [183] KLEMEN, J., CHAMBERS, C. D. *Current perspectives and methods in studying neural mechanisms of multisensory interactions*. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, vol. 36, 2012, no. 1, pp. 111-133, DOI: 10.1016/j.neubiorev.2011.04.015
- [184] CALVERT, G. A., THESEN, T. *Multisensory integration: methodological approaches and emerging principles in the human brain*. Journal of Physiology-Paris, vol. 98, 2004, no. 1-3, pp. 191-205, DOI: 10.1016/j.jphysparis.2004.03.018

- [185] LIANG, M., MOURAUX, A., IANNETTI, G. D. *Bypassing Primary Sensory Cortices—A Direct Thalamocortical Pathway for Transmitting Salient Sensory Information*. *Cerebral Cortex*, vol. 23, 2013, no. 1, pp. 1-11, DOI: 10.1093/cercor/bhr363
- [186] MESULAM, M. *From sensation to cognition*. *Brain*, vol. 121, 1998, no. 6, pp. 1013-1052, DOI: 10.1093/brain/121.6.1013
- [187] WALKER, P., BREMNER, J. G., MASON, U., et al. *Preverbal Infants' Sensitivity to Synaesthetic Cross-Modality Correspondences*. *Psychological Science*, vol. 21, 2010, no. 1, pp. 21-25, DOI: 10.1177/0956797609354734
- [188] BRANDWEIN, A. B., FOXE, J. J., RUSSO, N. N., ALTSCHULER, T. S., et al. *The Development of Audiovisual Multisensory Integration Across Childhood and Early Adolescence: A High-Density Electrical Mapping Study*. *Cerebral Cortex*, vol. 21, 2011, no. 5, pp. 1042-1055, DOI: 10.1093/cercor/bhq170
- [189] BAVELIER, D., NEVILLE, H. J. *Cross-modal plasticity: where and how?* *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 3, 2002, no. 6, pp. 443-452, DOI: 10.1038/nrn848
- [190] RÖDER, B., WALLACE, M. *Development and plasticity of multisensory functions*. *Restorative Neurology and Neuroscience*, vol. 28, 2010, no. 2, pp. 141-142, DOI: 10.3233/RNN-2010-0536
- [191] HERHOLZ, S. C., ZATORRE, R. J. *Musical Training as a Framework for Brain Plasticity: Behavior, Function, and Structure*. *Neuron*, vol. 76, 2012, no. 3, pp. 486-502, DOI: 10.1016/j.neuron.2012.10.011
- [192] LAPPE, C., HERHOLZ, S. C., TRAINOR, L. J., PANTEV, C. *Cortical Plasticity Induced by Short-Term Unimodal and Multimodal Musical Training*. *Journal of Neuroscience*, vol. 28, 2008, no. 39, pp. 9632-9639, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.2254-08.2008
- [193] LAPPE, C., TRAINOR, L. J., HERHOLZ, S. C., PANTEV, C., et al. *Cortical Plasticity Induced by Short-Term Multimodal Musical Rhythm Training*. *PLoS ONE*, vol. 6, 2011, no. 6, DOI: 10.1371/journal.pone.0021493
- [194] PARASKEVOPOULOS, E., KUCHENBUCH, A., HERHOLZ, S. C., et al. *Evidence for Training-Induced Plasticity in Multisensory Brain Structures: An MEG Study*. *PLoS ONE*, vol. 7, 2012, no. 5, DOI: 10.1371/journal.pone.0036534

- [195] BUTLER, A. J., JAMES, T. W., JAMES, K. H. *Enhanced Multisensory Integration and Motor Reactivation after Active Motor Learning of Audiovisual Associations*. Journal of Cognitive Neuroscience, vol. 23, 2011, no. 11, pp. 3515-3528, DOI: 10.1162/jocn_a_00015
- [196] BUTLER, A. J., JAMES, K. H. *Active Learning of Novel Sound-producing Objects: Motor Reactivation and Enhancement of Visuo-motor Connectivity*. Journal of Cognitive Neuroscience, vol. 25, 2013, no. 2, pp. 203-218, DOI: 10.1162/jocn_a_00284
- [197] BREMNER, A. J., LEWKOWICZ, D. J., SPENCE, C. *Multisensory Development*. Oxford University Press, 2012, ISBN 9780199586059. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780199586059.001.0001
- [198] STEIN, B. E., ROWLAND, B. A. *Organization and plasticity in multisensory integration: early and late experience affects its governing principles*. Progress in Brain Research, 2011, pp. 145-163, ISBN 9780444537522. DOI: 10.1016/B978-0-444-53752-2.00007-2
- [199] WALLACE, M. T., CARRIERE, B. N., PERRAULT, T. J., VAUGHAN, J. W., STEIN, B. E. *The Development of Cortical Multisensory Integration*. Journal of Neuroscience, vol. 26, 2006, no. 46, pp. 11844-11849, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3295-06.2006
- [200] CARRIERE, B. N., ROYAL, D. W., PERRAULT, T. J., et al. *Visual Deprivation Alters the Development of Cortical Multisensory Integration*. Journal of Neurophysiology, vol. 98, 2007, no. 5, pp. 2858-2867, DOI: 10.1152/jn.00587.2007
- [201] WALLACE, M. T., STEIN, B. E. *Early Experience Determines How the Senses Will Interact*. Journal of Neurophysiology, vol. 97, 2007, no. 1, pp. 921-926, DOI: 10.1152/jn.00497.2006
- [202] NEIL, P. A., CHEE-RUITER, C., SCHEIER, C., LEWKOWICZ, D. J., SHIMOJO, S. *Development of multisensory spatial integration and perception in humans*. Developmental Science, vol. 9, 2006, no. 5, pp. 454-464, DOI: 10.1111/j.1467-7687.2006.00512.x
- [203] BAHRICK, L. E., LICKLITER, R. *Intersensory redundancy guides attentional selectivity and perceptual learning in infancy*. Developmental Psychology, vol. 36, 2000, no. 2, pp. 190-201, DOI: 10.1037//0012-1649.36.2.190

- [204] MOLHOLM, S., et al. *Multisensory Visual-Auditory Object Recognition in Humans: a High-density Electrical Mapping Study*. *Cerebral Cortex*, vol. 14, 2004, no. 4, pp. 452-465, DOI: 10.1093/cercor/bhh007
- [205] ULLSPERGER, P., ERDMANN, U., FREUDE, G., DEHOFF, W. *When sound and picture do not fit: Mismatch negativity and sensory interaction*. *International Journal of Psychophysiology*, vol. 59, 2006, no. 1, pp. 3-7, DOI: 10.1016/j.ijpsycho.2005.06.007
- [206] SPENCE, C. *Crossmodal correspondences: A tutorial review*. *Attention, Perception, & Psychophysics*, vol. 73, 2011, no. 4, pp. 971-995, DOI: 10.3758/s13414-010-0073-7
- [207] SADATO, N., PASCUAL-LEONE, A., GRAFMAN, J., IBÁÑEZ, V., DEIBER, M.-P., et al. *Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects*. *Nature*, vol. 380, 1996, no. 6574, pp. 526-528, DOI :10.1038/380526a0
- [208] COLLIGNON, O., VOSS, P., LASSONDE, M., LEPORE, F. *Cross-modal plasticity for the spatial processing of sounds in visually deprived subjects*. *Experimental Brain Research*, vol. 192, 2009, no. 3, pp. 343-358, DOI: 10.1007/s00221-008-1553-z
- [209] AMEDI, A., FLOEL, A., KNECHT, S., ZOHARY, E., COHEN, L. G. *Transcranial magnetic stimulation of the occipital pole interferes with verbal processing in blind subjects*. *Nature Neuroscience*, vol. 7, 2004, no. 11, pp. 1266-1270, DOI: 10.1038/nn1328
- [210] LEONARD, M. K., FERJAN RAMIREZ, N., TORRES, C., TRAVIS, K. E., HATRAK, M., MAYBERRY, R. I., HALGREN, E. *Signed Words in the Congenitally Deaf Evoke Typical Late Lexicosemantic Responses with No Early Visual Responses in Left Superior Temporal Cortex*. *Journal of Neuroscience*, vol. 32, 2012, no. 28, pp. 9700-9705, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1002-12.2012
- [211] SCHULZ, M., ROSS, B., PANTEV, C. *Evidence for training-induced crossmodal reorganization of cortical functions in trumpet players*. *NeuroReport*, vol. 14, 2003, no. 1, pp. 157-161, DOI: 10.1097/00001756-200301200-00029
- [212] HASLINGER, B., ERHARD, P., ALTENMÜLLER, E., SCHROEDER, U., BOECKER, H. CEBALLOS-BAUMANN, A. O. *Transmodal Sensorimotor Networks during Action Observation in Professional Pianists*. *Journal of Cognitive Neuroscience*, vol. 17, 2005, no. 2, pp. 282-293, DOI: 10.1162/0898929053124893

- [213] STEVENSON, R. A., WILSON, M. M., POWERS, A. R., WALLACE, Mark T. *The effects of visual training on multisensory temporal processing*. Experimental Brain Research, vol. 225, 2013, no. 4, pp. 479-489, DOI: 10.1007/s00221-012-3387-y
- [214] CHEN, J. L., RAE, C., WATKINS, K. E. *Learning to play a melody: An fMRI study examining the formation of auditory-motor associations*. NeuroImage, vol. 59, 2012, no. 2, pp. 1200-1208, DOI: 10.1016/j.neuroimage.2011.08.012
- [215] NAUMER, M. J., DOEHRMANN, O., MULLER, N. G., et al. *Cortical Plasticity of Audio-Visual Object Representations*. Cerebral Cortex, vol. 19, 2009, no. 7, pp. 1641-1653, DOI: 10.1093/cercor/bhn200
- [216] SCHOLZ, J., KLEIN, M. C., BEHRENS, T. E. J., JOHANSEN-BERG, H. *Training induces changes in white-matter architecture*. Nature Neuroscience, vol. 12, 2009, no. 11, pp. 1370-1371, DOI: 10.1038/nn.2412
- [217] ZATORRE, R. J., CHEN, J. L., PENHUNE, V. B. *When the brain plays music: auditory-motor interactions in music perception and production*. Nature Reviews Neuroscience, vol. 8, 2007, no. 7, pp. 547-558, DOI: 10.1038/nrn2152
- [218] SHAMS, L., SEITZ, A. R. *Benefits of multisensory learning*. Trends in Cognitive Sciences, vol. 12, 2008, no. 11, pp. 411-417, DOI: 10.1016/j.tics.2008.07.006
- [219] WALLACE, M. T. *The development of multisensory processes*. Cognitive Processing, vol. 5, 2004, no. 2, pp. 69-83, DOI: 10.1007/s10339-004-0017-z
- [220] MISHRA, J., MARTINEZ, A., SEJNOWSKI, T. J., HILLYARD, S. A. *Early Cross-Modal Interactions in Auditory and Visual Cortex Underlie a Sound-Induced Visual Illusion*. Journal of Neuroscience, vol. 27, 2007, no. 15, pp. 4120-4131, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4912-06.2007
- [221] ROELFSEMA, P. R., ENGEL, A. K., KÖNIG, P., SINGER, W. *Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas*. Nature, vol. 385, 1997, no. 6612, pp. 157-161, DOI: 10.1038/385157a0
- [222] BUTLER, J. S., FOXE, J. J., FIEBELKORN, I. C., MERCIER, M. R., MOLHOLM, S. *Multisensory Representation of Frequency across Audition and Touch: High Density Electrical Mapping Reveals Early Sensory-Perceptual Coupling*. Journal

of Neuroscience, vol. 32, 2012, no. 44, pp. 15338-15344, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.1796-12.2012

[223] SEITZ, A. R., DINSE, H. R. *A common framework for perceptual learning*. Current Opinion in Neurobiology, vol. 17, 2007, no. 2, pp. 148-153, DOI: 10.1016/j.conb.2007.02.004

[224] SCHNEIDER, S., SCHÖNLE, P. W., ALTENMÜLLER, E., MÜNTE T. F. *Using musical instruments to improve motor skill recovery following a stroke*. Journal of Neurology, vol. 254, 2007, no. 10, pp. 1339-1346, DOI: 10.1007/s00415-006-0523-2

[225] ALTENMÜLLER, E., MARCO-PALLARES, J., MÜNTE, T. F., SCHNEIDER, S. *Neural Reorganization Underlies Improvement in Stroke-induced Motor Dysfunction by Music-supported Therapy*. Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 1169, 2009, no. 1, pp. 395-405, DOI: 10.1111/j.1749-6632.2009.04580.x

[226] BHATT, T., YANG, F., MAK, M. K.Y., HUI-CHAN, C. W., PAI Y. C. *Effect of Externally Cued Training on Dynamic Stability Control During the Sit-to-Stand Task in People With Parkinson Disease*. Physical Therapy, vol. 93, 2013, no. 4, pp. 492-503, DOI: 10.2522/ptj.20100423

[227] MOZOLIC, J., HUGENSCHMIDT, C., PEIFFER, A., LAURIENTI, P. *Multisensory integration and aging*. The neural bases of multisensory processes, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2012

[228] BHATTACHARYA, J., SHAMS, L., SHIMOJO, S. *Sound-induced illusory flash perception: role of gamma band responses*. NeuroReport, vol. 13, 2002, no. 14, pp. 1727-1730, DOI: 10.1097/00001756-200210070-00007

[229] SCHROEDER, C. E., LAKATOS, P., KAJIKAWA, Y., PARTAN, S., PUCE, A. *Neuronal oscillations and visual amplification of speech*. Trends in Cognitive Sciences, vol. 12, 2008, no. 3, pp. 106-113, DOI: 10.1016/j.tics.2008.01.002

[230] AHISSAR, M., HOCHSTEIN, S. *The reverse hierarchy theory of visual perceptual learning*. Trends in Cognitive Sciences, vol. 8, 2004, no. 10, pp. 457-464, DOI: 10.1016/j.tics.2004.08.011

- [231] FAHLE, M. *Perceptual learning: specificity versus generalization*. *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 15, 2005, no. 2, pp. 154-160, DOI: 10.1016/j.conb.2005.03.010
- [232] GILBERT, C. D., SIGMAN, M., CRIST, R. E. *The Neural Basis of Perceptual Learning*. *Neuron*, vol. 31, 2001, no. 5, pp. 681-697, DOI: 10.1016/S0896-6273(01)00424-X
- [233] SEITZ, A., WATANABE, T. *A unified model for perceptual learning*. *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 9, 2005, no. 7, pp. 329-334, DOI: 10.1016/j.tics.2005.05.010
- [234] SEITZ, A. R., KIM, R., SHAMS, L. *Sound Facilitates Visual Learning*. *Current Biology*, vol. 16, 2006, no. 14, pp. 1422-1427, DOI: 10.1016/j.cub.2006.05.048
- [235] FURMANSKI, C. S., SCHLUPPECK, D., ENGEL, S. A. *Learning Strengthens the Response of Primary Visual Cortex to Simple Patterns*. *Current Biology*, vol. 14, 2004, no. 7, pp. 573-578, DOI: 10.1016/j.cub.2004.03.032
- [236] SCHOUPS, A. A., VOGELS, R., ORBAN, G. A. *Human perceptual learning in identifying the oblique orientation: retinotopy, orientation specificity and monocularity*. *The Journal of Physiology*, vol. 483, 1995, no. 3, pp. 797-810, DOI: 10.1113/jphysiol.1995.sp020623
- [237] WATANABE, T., NÁÑEZ, J. E., KOYAMA, S., MUKAI, I. et al. *Greater plasticity in lower-level than higher-level visual motion processing in a passive perceptual learning task*. *Nature Neuroscience*, vol. 5, 2002, no. 10, pp. 1003-1009, DOI: 10.1038/nn915
- [238] SHIMOJO, S. *Sensory modalities are not separate modalities: plasticity and interactions*. *Current Opinion in Neurobiology*, vol. 11, 2001, no. 4, pp. 505-509, DOI: 10.1016/S0959-4388(00)00241-5
- [239] CALVERT, G. A., SPENCE, C., STEIN, B. E. *The Handbook of Multisensory Processes*. London: Massachusetts Institute of Technology, 2004, ISBN 9780262033213.
- [240] VON KRIEGSTEIN, K., GIRAUD, A. L., UNGERLEIDER, L. *Implicit Multisensory Associations Influence Voice Recognition*. *PLoS Biology*, vol. 4, 2006, no. 10, DOI: 10.1371/journal.pbio.0040326

- [241] KIM, R. S., SEITZ, A. R., SHAMS, L., HERZOG, M. *Benefits of Stimulus Congruency for Multisensory Facilitation of Visual Learning*. PLoS ONE, vol. 3, 2008, no. 1, DOI: 10.1371/journal.pone.0001532
- [242] ALLMAN, B. L., KENISTON, L. P., MEREDITH, M. A. *Subthreshold auditory inputs to extrastriate visual neurons are responsive to parametric changes in stimulus quality: Sensory-specific versus non-specific coding*. Brain Research, vol. 1242, 2008, pp. 95-101, DOI: 10.1016/j.brainres.2008.03.086
- [243] LAKATOS, P., CHEN, C. M., O'CONNELL, M. N., et al. *Neuronal Oscillations and Multisensory Interaction in Primary Auditory Cortex*. Neuron, vol. 53, 2007, no. 2, pp. 279-292, DOI: 10.1016/j.neuron.2006.12.011
- [244] ALPERT, G. F., HEIN, G., TSAI, N., NAUMER, M. J., KNIGHT, R. T. *Temporal Characteristics of Audiovisual Information Processing*. Journal of Neuroscience, vol. 28, 2008, no. 20, pp. 5344-5349, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5039-07.2008
- [245] MARTUZZI, R., MURRAY, M. M., MICHEL, C. M., THIRAN, J. P., et al. *Multisensory Interactions within Human Primary Cortices Revealed by BOLD Dynamics*. Cerebral Cortex, vol. 17, 2007, no. 7, pp. 1672-1679, DOI: 10.1093/cercor/bhl077
- [246] FRISTON, K. *A theory of cortical responses*. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, vol. 360, 2005, no. 1456, pp. 815-836, DOI:10.1098/rstb.2005.1622
- [247] RAO, R. P., BALLARD, D. H. *Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects*. Nature Neuroscience, vol. 2, 1999, no. 1, pp. 79-87, DOI: 10.1038/4580
- [248] FISER, J., ASLIN, R. N. *Unsupervised Statistical Learning of Higher-Order Spatial Structures from Visual Scenes*. Psychological Science, vol. 12, 2001, no. 6, pp. 499-504, DOI: 10.1111/1467-9280.00392
- [249] KAWAHARA, J. I. *Auditory-visual contextual cuing effect*. Perception & Psychophysics, vol. 69, 2007, no. 8, pp. 1399-1408, DOI: 10.3758/BF03192955

- [250] TANABE, H. C. *Functionally Segregated Neural Substrates for Arbitrary Audiovisual Paired-Association Learning*. Journal of Neuroscience, vol. 25, 2005, no. 27, pp. 6409-6418, DOI: 10.1523/JNEUROSCI.0636-05.2005
- [251] MICHEL, M. M. JACOBS, R. A. *Parameter learning but not structure learning: A Bayesian network model of constraints on early perceptual learning*. Journal of Vision, vol. 7, 2007, no. 1, DOI: 10.1167/7.1.4
- [252] ERNST, M. O. *Learning to integrate arbitrary signals from vision and touch*. Journal of Vision, vol. 7, 2007, no. 5, DOI: 10.1167/7.5.7
- [253] LURIA, A. R. *The Mind of a Mnemonist: A Little Book About a Vast Memory*. Harvard University Press, 1987, ISBN 9780674576223.
- [254] LEHMANN, S., MURRAY, M. M. *The role of multisensory memories in unisensory object discrimination*. Cognitive Brain Research, vol. 24, 2005, no. 2, pp. 326-334, DOI: 10.1016/j.cogbrainres.2005.02.005
- [255] HAMILTON, W., MANSEL, H. L., VEITCH, J. *Lectures on metaphysics and logic*. Metaphysics. Boston: Gould and Lincoln, vol. 1, 1859, DOI: 10.1037/12154-000
- [256] HOROWITZ, L. M., PRYTULAK, L. S. *Redintegrative memory*. Psychological Review, vol. 76, 1969, no. 6, pp. 519-531, DOI: 10.1037/h0028139
- [257] NYBERG, L., HABIB, R., MCINTOSH, A. R., TULVING, E. *Reactivation of encoding-related brain activity during memory retrieval*. Proceedings of the National Academy of Sciences, vol. 97, 2000, no. 20, pp. 11120-11124, DOI: 10.1073/pnas.97.20.11120
- [258] HARP, S.F., MAYER, R.E. *How seductive details do their damage: a theory of cognitive interest in science learning*. Journal of Educational Psychology, vol. 90, 1998, no. 3, pp. 414-434