



VILNIAUS UNIVERSITETAS

Gyvybės mokslų centras

Neurobiologijos ir biofizikos katedra

Neurobiologijos studijų programos II kurso studentė

Indrė PRETKELYTĖ

Magistrinis darbas

**Užsienio kalbos apdorojimo ir darbinės atminties funkcinė
lateralizacija smegenyse**

Darbo vadovės:

Doc., dr. Ramunė Grikšienė

Dokt. Rimantė Gaižauskaitė

Mokslinis konsultantas:

Prof. Markus Hausmann, Durham universitetas, UK

Vilnius, 2021

Smegenų pusrutulių lateralizacija apdorojant užsienio kalbą ir darbinę atmintį

Darbas atliktas Gyvybės mokslų centro psichofiziologijos laboratorijoje

Darbą atliko:

Indrė Pretkelytė

Darbo vadovės:

Ramunė Grikšienė

Rimantė Gaižauskaitė

TURINYS

Santrumpos.....	5
Įvadas	6
1. LITERATŪROS APŽVALGA	8
1.1. Smegenų lateralizacija	8
1.1.1. Lateralizuotos kognityvinės funkcijos	8
1.1.2. Lyties įtaka smegenų lateralizacijai.....	9
1.1.3. Rankiškumo įtaka lateralizacijai	11
1.2. Kalba	12
1.2.1. Kalbos centrai ir apdorojimo vieta	12
1.2.2. Naujai išmokstamų kalbų lateralizacija	15
1.3. Atmintis	16
1.3.1. Atminties tipai	16
1.3.2. Darbinė atmintis.....	17
1.3.3. Vizualinės darbinės atminties talpa.....	18
1.3.4. Darbinės atminties lateralizacija	19
1.4. Smegenų lateralizacijos metodai	20
1.4.1. Pusės regos lauko paradigma	20
2. METODIKA	23
2.1. Dalyviai	23
2.2. Klausimynai	23
2.2.1. Demografinis klausimynas	23
2.2.2. Rankiškumo vertinimas.....	23
2.2.3. Kalbos istorijos klausimynas (LHQ 3.0)	23
2.3. Translingvistinė leksinio sprendimo užduotis (TLDT).....	24
2.3.1. TLDT užduoties atlikimas	25
2.4. Darbinės vizualinės atminties užduotis (VWM).....	26
2.5. Bendra viso eksperimento procedūra.....	27

3. DUOMENŲ ANALIZĖ	28
4. REZULTATAI	29
4.1. Dalyviai	29
4.2. TLDT užduoties rezultatai	29
4.2.1. TLDT atlikimo tikslumas	29
4.2.2. TLDT reakcijos laikas	30
4.3. Vizualinės darbinės atminties užduoties rezultatai	31
4.3.1. Atminties talpa	31
4.3.2. VWM užduoties atlikimo tikslumas	32
4.3.1. Reakcijos laikas VWM užduotyje	33
4.4. Sąsajos tarp TLDT ir VWM užduočių atlikimo parametrų vertinimas	34
5. REZULTATŲ APTARIMAS	35
4.1. Tyrimo apribojimai	37
5. IŠVADOS	39
Literatūros sąrašas	42

Santrumpos

ACC – užduoties atlikimo tikslumas (nuo angl. *accuracy*)

EEG – elektroencefalografija arba elektroencefalograma

fMRT – funkcinis magnetinio rezonanso vaizdinimas

LH – kairysis galvos smegenų pusrutulis (nuo angl. *left hemisphere*)

LVF – kairysis regos laukas (nuo angl. *left visual field*)

LI – laterališkumo indeksas

MEG – magnetoencefalograma

MLD – kalbos įvairovės balas (nuo angl. *multilingual language diversity*)

PET – pozitronų emisijos tomografija

RH – dešinysis galvos smegenų pusrutulis (nuo angl. *right hemisphere*)

RHV – dešinysis regos laukas (nuo angl. *right visual field*)

TLDT – translingvistinė leksinio sprendimo užduotis (angl. *translingual lexical decision task*)

VWM – vizualinė darbinė atmintis (angl. *visual working memory*)

Ivadas

Smegenų pusrutulių lateralizacija – tai įvairių kognityvinių funkcijų pasiskirstymas tarp kairiojo galvos smegenų pusrutulio ir dešiniojo smegenų pusrutulio. Funkciniai smegenų pusrutulių skirtumai yra viena iš labiausiai tyrimais pagrįstų žmogaus smegenų savybių (Bourne, 2006). Klinikinių stebėjimų metu, kuomet buvo stebimi pacientai, turintys vieno smegenų pusrutulio pažeidimus, buvo nustatyta smegenų pusrutulių specializacija arba kitaip tariant vieno iš smegenų pusrutulių dominavimas apdorojant tam tikrą informaciją ar realizuojant tam tikras kognityvines funkcijas (Broca, 1865; Lanczik & Keil, 1991). Klinikiniai tyrimai jau septintajame dešimtmetyje parodė, jog kairysis smegenų pusrutulis (LH; angl. *left hemisphere*) yra dominuojantis apdorojant kalbą (Broca, 1865). Kiti klinikiniai tyrimai atskleidė, kad dešinysis smegenų pusrutulis (RH; angl. *right hemisphere*) dominuoja veidų atpažinime ir erdviniam orientavimesi (Levine et al., 1988). Vėlesni tyrimai išskėlė lateralizacijos skirtumų tarp lyčių hipotezę, kuri teigia, jog vyrai turi labiau asimetrišką smegenis, t.y. kairysis smegenų pusrutulis aiškiai specializuotas kalbos apdorojimui, o dešinysis – erdviniam (Grabowska, 2017; J. Levy, 1972). Tačiau lyčių skirtumai smegenų kognityvinių funkcijų lateralizacijoje vis dar yra prieštaringi (Hirnstain et al., 2019). Šiandien, LH dominavimas kalbos, o RH dominavimas erdviniam apdorojime yra vienos iš dažniausiai tyrimais patvirtinamų smegenų funkcinų lateralizacijų (Hugdahl, 2000).

Specifinių smegenų pusrutuliams funkcijų lokalizavimui yra naudojamos įvairios smegenų vaizdinimo metodikos – funkcinio magnetinio rezonanso vaizdinimas (fMRT), pozitronų emisijos tomografija (PET), elektroencefalografija (EEG), magnetoencefalografija (MEG) (Hickok & Poeppel, 2007; Vigneau et al., 2006). Tačiau nors visos šios metodikos yra naudojamos ir yra patikimos, jos yra brangios (fMRT, PET, MEG), ir/arba reikalaujančios daug laiko (fMRT, PET, MEG, EEG), be to, ne visiems tyrėjams prieinamos. Todėl, siekiant smegenų pusrutulių funkcinę laterališkumą įvertinti kuo didesnėse žmonių imtyse, tokiu būdu surenkant daugiau informacijos, yra reikalingi ir alternatyvūs, paprastesni metodai.

Vienas iš tokių, yra psichofizikinis metodas paremtas pusės regos lauko (angl. *VHF – visual half field*) paradigma. Tai metodas, kurį naudojant stimulai pateikiami į dešinįjį arba kairįjį regos lauką, o analizuojami kintamieji yra užduoties atlikimo parametrai (Bourne, 2006).

Nors šis metodas yra taikomas kalbos lateralizacijai tirti (Hausmann et al., 2019; Hunter & Brysbaert, 2008; Willemin et al., 2016), vis dar yra abejojančių vizualinio pusės lauko paradigmos, kaip patikimo metodo naudojimu (Bishop, 2013; Krach et al., 2006). Todėl reikalingi papildomi tyrimai, kurių rezultatai papildytų žinias apie metodikos privalumus ir trūkumus ir, galbūt, prisidėtų identifikuojant sritis, kuriose tokia metodika leistų greičiau, pigiau ir paprasčiau nustatyti smegenų kognityvinių funkcijų lateralizaciją. Minėtuose kalbos lateralizacijos tyrimuose buvo

nustatyta, kad dalyviai užduotį geriau atlieka tada, kai stimulus yra pateikiamas dešiniajame regos lauke ir jį apdoroja kairysis smegenų pusrutulius (Bourne, 2006). Dauguma tokių tyrimų atlikti su gimtąją/pagrindine kalba, tuo tarpu apie negimtosios ir/ar užsienio kalbos apdorojimo laterališkumą žinoma žymiai mažiau ir, nėra aišku ar VHF paradigma, yra tinkama jam įvertinti.

Kalbos apdorojimas neišvengiamai apima ir darbinės atminties procesus, ypač sakiniai su sudėtingomis sintaksinėmis struktūromis. Pateikiami neuroanatominiai pagrindinių sintaksinių procesų ir darbinės atminties įrodymai, tačiau dinaminis ryšys tarp šių sistemų dar nėra nustatytas. Vaizdinė kalbinė informacija gali būti netiesiogiai perduodama pagrindinėms kalboms sistemoms, o WM sistema tarnauja kaip mediatorius tarp sensorinės ir kalbos sistemų (Makuuchi & Friederici, 2013).

Yra žinoma, kad formuojantis ir išlaikant informaciją darbinėje atmintyje ypač svarbios yra kaktinės žievės sritys (Miller & Cohen, 2001). Darbinės atminties lateralizacijos tyrimai buvo atliekami atskiriant verbalinę darbinę atmintį ir vizualinę darbinę atmintį. Buvo išskirta, jog verbalinė ir akustinė informacija aktyvuoja Broca ir Wernicke sritis, tuo tarpu vizualinė – erdvinė informacija aktyvuoja dešinįjį smegenų pusrutulį (Tulving & Craik, 2000).

Magistrinio darbo tikslas - pasitelkiant pusės regos lauko paradigmą ištirti užsienio kalbos ir regimosios darbinės atminties laterališkumą bei sąsajas tarp šių kognityviųjų funkcijų lateralizacijos.

Tikslui pasiekti suformuluoti uždaviniai:

- ✓ Ištirti darbinės atminties ir užsienio kalbos apdorojimo lateralizaciją įvertinant:
 - regos lauko (dešinė vs kairė) įtaką užduočių atlikimo tikslumui ir reakcijos laikui;
 - lyties įtaką lateralizacijai;
 - kitų faktorių, kaip anglų kalbos mokėjimo lygio, rankiškumo įtaką užsienio kalbos ir vizualinės darbinės atminties lateralizacijai;
- ✓ Ištirti ryšį tarp kalbos ir regimosios darbinės atminties lateralizacijos.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Smegenų lateralizacija

Smegenų lateralizacija tai struktūriniai ir/ar funkciniai skirtumai tarp dešiniojo ir kairiojo pusrutulių. Daugiausia dėmesio skiriama smegenų pusrutulių lateralizacijos sąsajoms su elgesiu, kognityviosiomis funkcijomis, emocijų apdorojimu ir pan. (Hugdahl, 2000). Kitaip tariant, yra keliami klausimai, ar kairysis ir dešinysis smegenų pusrutulis kontroliuoja skirtingas funkcijas ir apdoroja informaciją skirtingais būdais. Tokie funkciniai skirtumai gali egzistuoti be akivaizdžių, ar žinomų struktūrinių skirtumų (Rogers, 2015).

Daugiau nei šimtmetį, nuo pat atradimo žmogaus smegenyse 1860 metais, lateralizacija buvo laikoma unikalia žmogaus smegenų savybe, padarančia žmogų pranašesniu už kitus gyvūnus. Tačiau jau aštuntajame ir devintajame dešimtmečiuose ši klaidingą požiūrį paneigė funkcinio laterališkumo atradimas grauzikų ir paukščių rūšyse (Chatterjee & Coslett, 2013; Corballis, 1991).

Funkciniai smegenų pusrutulių skirtumai yra viena iš geriausiai tyrimais pagrįstų neuropsichologinių žmogaus smegenų savybių. Pavyzdžiui yra sutariama, kad, svarbiausios su kalbos funkcija susijusios sritys yra lokalizuotos kairiajame smegenų pusrutulyje, o dešinysis pusrutulis labiau specializuotas erdvinėse funkcijose (Pujol et al., 1999).

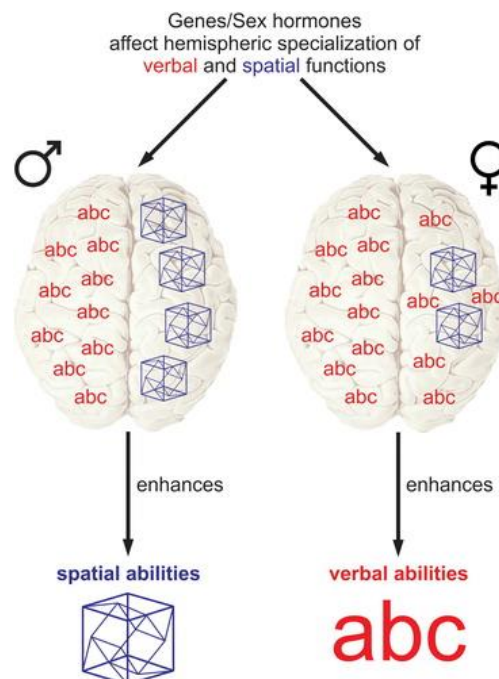
1.1.1. Lateralizuotos kognityvinės funkcijos

Žmonių smegenų pusrutulių pažeidimai parodė, jog abu smegenų pusrutuliai turi papildomas specializuotas funkcijas: kairysis smegenų pusrutulis yra skirtas kalbai ir veiksams, o dešinysis – dėmesiui ir regimajam erdviniam suvokimui (Levine et al., 1988). Pagal anatominę asimetriją, didesni plotai aplink Silvijaus vagą (angl. *Perisylvian region*) yra randami kairiajame smegenų pusrutulyje (McCauley, 2013). O pagal fiziologinę asimetriją, stebime didesnę dešiniojo smegenų pusrutulio aktyvavimą orientuojant erdvinį dėmesį, suvokiant veidus ir muzikos melodijas, erdvinius vaizdus, priimant ir koduojant neverbalinę informaciją bei analizuojant pragmatinius kalbos apdorojimo aspektus. Kairiojo smegenų pusrutulio didesnis aktyvavimas pasireiškia žodžių ir objektų suvokimui, žodžio garso, gramatikos ir prasmės apdorojimui, žodinės semantinės atminties kodavimui ir gavimui. Taip pat yra duomenų apie individualius emocinio apdorojimo skirtumus, pagrįstus priekinės skilties EEG asimetrija (Zaidel, 2001).

Žiūrint į makroskopinę žmogaus smegenų funkcinę organizaciją, faktiškai pagrindžiama, jog tam tikri gebėjimai, tokie kaip kalba, erdvinis dėmesys ir rankų pirmenybė motorinei koordinacijai, yra santykinai nukreipti į vieną iš smegenų pusrutulių (Gotts et al., 2013).

1.1.2. Lyties įtaka smegenų lateralizacijai

Smegenų lateralizacijos skirtumai tarp lyčių buvo pastebėti aštuntajame dešimtmetyje (Fairweather, 1976). J. Levy atlikus tyrimą, kuriame naudojo Wechsleirio intelekto skalę verbalinių ir neverbalinių užduočių įvertinimui, pasiūlė idėją, jog vyrai turi labiau asimetriškas smegenis, t.y. kairysis smegenų pusrutulis aiškiai specializuotas kalbos apdorojimui, o dešinysis – erdviniam. Anot šios hipotezės, moterų smegenys yra labiau bilaterali – kairysis ir dešinysis smegenų pusrutuliai ne taip specializuoti ir abu yra įtraukiami į kalbos apdorojimą. Todėl vyrų smegenų asimetriškumas gali turėti įtakos jų erdvinių įgūdžių pranašumui prieš moteris, o mažiau lateralizuotos moterų smegenys – jų pranašumą žodiniuose įgūdžiuose (J. Levy, 1972) (1.1. pav.).



1.1. pav. Supaprastintas J. Levy hipotezės modelis. Vyrų turi stipresnę smegenų lateralizaciją žodiniuose ir erdvinėse užduotyse. Stipresnė lateralizacija sustiprina erdvinius sugebėjimus, tuo tarpu bilateralinė lateralizacija - žodinius sugebėjimus (Boles & Barth, 2011).

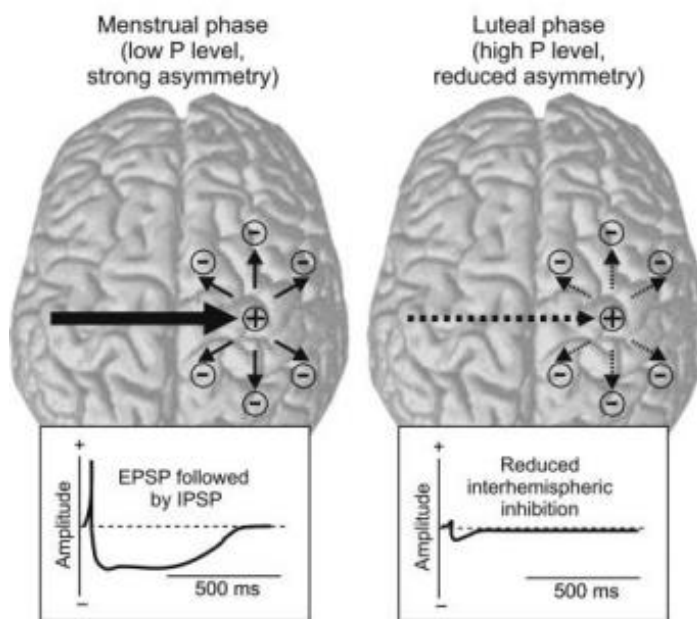
Buvo pateiktos kelios panašios teorijos, visos jos teigia, jog lytiniai kognityvinių gebėjimų skirtumai atsiranda dėl smegenų pusrutulių asimetrijos skirtumų. Ši idėja labai išpopuliarėjo – buvo atlikta tyrimų, kuriuose aiškinamas santykis tarp lyties, kognityvinių funkcijų ir pusrutulių asimetrijos (Kimura, 1999; Springer & Deutsch, 1981). Ir nors šis entuziazmas laikui einant blėso atsiradus prieštarīgiems tyrimų rezultatams, kognityviniai lyčių skirtumai dėl smegenų pusrutulių asimetrijos aprašomi ir šiuolaikinių tyrėjų (Grabowska, 2017; Pletzer, 2014).

Neurovaizdinimo metodais paremtuose tyrimuose daugiausia dėmesio skiriama didžiosios smegenų jungties skirtumams – pusrutulius jungiančių komisūrinių skaidulų juostos, kuri būtina

smegenų pusrutulių komunikacijai ir funkcinei integracijai (Grabowska, 2017). Tyrimai parodė didžiosios smegenų jungties formos ir/arba skerspjūvio paviršiaus ploto skirtumus tarp lyčių, ypač užpakalinėje didžiosios smegenų jungties dalyje (stormenyje ir sąsmaukoje). Nustatyta, jog moterų smegenyse šis regionas yra apvalesnis ir didesnis nei vyrų smegenyse (DeLacoste-Utamsing & Holloway, 1982; Dubb et al., 2003). O kadangi momeniniai (angl. *peristrikel*), regimieji (angl. *parietal*) ir viršutiniai smilkininiai (angl. *superior temporal*) pluoštai eina per stormenį (angl. *splenium*), šie atradimai buvo siejami su lateralizacijos laipsnio skirtumais tarp lyčių visose erdvinėse užduotyse, kartu su elgesio tyrimais, rodančiais didesnę moterų smegenų pusrutulių simetriją. Buvo teigiama, kad didesnė smegenų jungtis suteikia geresnę pusrutulių tarpusavio komunikaciją ir taip sumažina jų asimetriją (Grabowska, 2017). Taip pat, nustatyta, jog šio regiono dydis teigiamai koreliuoja su kalbos sklandumo užduočių atlikimu ir neigiamai su kalbos lateralizacija (Hines et al., 1992). Tačiau keli naujausi tyrimai parodė, jog absoliutus didžiosios smegenų jungties dydis vyrų smegenyse yra didesnis, o statistiškai koreguojant smegenų dydį lyties skirtumas gali išnykti (Gupta et al., 2011; Luders et al., 2014).

Atlikus struktūrinį MRT tyrimą buvo pastebėta, jog vyrai turi stipresnę viršutinės smilkininės skilties (angl. *temporal plane*) klostės asimetriją, o atlikus viso genomo asociacijos tyrimą buvo susieta viršutinės smilkinio skilties klostės asimetrija su steroidinių hormonų receptorių aktyvumu ir steroidinių medžiagų apykaitos procesais, patvirtinančiais, kad lytiniai hormonai gali atlikti lemiamą vaidmenį smegenų pusrutulių asimetrijos skirtumams tarp lyčių (Guadalupe et al., 2015).

Taip pat, M. Hausmann ir U. Bayer (2010) pastebėjo, jog estradiolio ir/arba progesterono lygis koreliuoja su funkcinė smegenų asimetrija – liuteininėje fazėje, kuomet yra aukštas progesterono ir estradiolio lygis, stebima mažesnė smegenų asimetrija, palyginus su folikuline faze, kai šių hormonų lygis moteryse yra žemas (1.2. pav.). Daroma prielaida, jog nuo ciklo priklausantis progesterono koncentracijos padidėjimas liuteininėje fazėje sumažina glutamaterginių ne NMDA receptorių ir padidina GABA receptorių aktyvumą, kas veda prie sumažėjusio neuroninio tinklo aktyvumo didžiojoje smegenų jungtyje, o tai lemia mažesnę funkcinę asimetriją (Hausmann & Güntürkün, 2000). Šie tyrimai rodo, kad lytiniai smegenų pusrutulių asimetrijos skirtumai priklauso nuo hormoninės būklės ir menstruacinio ciklo dienos. Tačiau vis dar nėra tiksliai žinoma kaip lytiniai hormonai dalyvauja pusrutulių funkcinėje ir anatominėje specializacijoje (Hausmann, 2017; Hausmann & Bayer, 2010; Pletzer, 2014).



1.2. pav. Pusrutulių asimetrijos priklausomybė nuo progesterono lygio (Hausmann & Bayer, 2010).

Smegenų lateralizacija, taip pat, gali būti viena iš priežasčių skirtingo neuropsichiatrinų susirgimų (tokių kaip autizmo spektro sutrikimai ir šizofrenija) paplitimo tarp lyčių (Baron-Cohen et al., 2005; Narr et al., 2001). Tačiau vyrų ir moterų smegenų funkcijų lateralizacijos skirtumų rezultatai vis dar yra priešaringi. Šiuo metu nėra pakankamai duomenų, leidžiančių daryti išvadą, jog smegenų pusrutulių asimetrija ir kognityvinių užduočių skirtumai tarp lyčių nėra susiję, tačiau galime daryti išvadą, jog smegenų asimetrijos skirtumai tarp lyčių nėra pagrindinė priežastis lemianti kognityvinių funkcijų skirtumus (Hirnstain et al., 2019).

1.1.3. Rankiškumo įtaka lateralizacijai

Iki neurovaizdinimo metodų atsiradimo, J. Levy hipotezė buvo tiriama naudojant rankiškumą kaip lateralizacijos rodiklį (Harshman et al., 1983; Sherman, 1979), tačiau ši metodika turi apribojimų. J. Levy laikėsi nuomonės, jog kairiarankių bilateralios smegenys stiprina jų žodinius įgūdžius ir trukdo erdviniams įgūdžiams. Kairiarankiai yra labiau linkę į bilateralią lateralizaciją kalbų apdorojime (~ 15 %) nei dešiniarankiai (~ 4 %), tačiau dauguma kairiarankių (~ 70 %) ir dešiniarankių (~ 96 %) yra lateralizuoti į kairiąją pusę kalbos apdorojime. Akivaizdu, jog kairiarankių bilaterališkumas yra kur kas retesnis, nei mane Levy, ir kiti veiksniai turi didesnę įtaką smegenų asimetrijai nei rankiškumas. Van der Haegen su kolegomis (2013) nustatė, jog kalbos lateralizacijai nustatyti (fMRT) yra kur kas patikimiau naudoti dischotinį klausymą, nei rankiškumą.

Sherman jau 1979 metais atmetė Levy hipotezę pateikdama tyrimus, kurie davė skirtingus rezultatus (Sherman, 1979). Vėlesniais metais buvo toliau nagrinėjamas rankiškumo ir

kognityvinių funkcijų ryšys. Pasak Mellet ir kolegų (2014), šiuos rankiškumo ir kognityvinių funkcijų tyrimus galima suskirstyti į tris kategorijas: pirmoji, kuriame dešiniarankiai visada geriau atlieka visas kognityvines užduotis (Johnston et al., 2009), antroji – skirtumų tarp kairiarankių ir dešiniarankių nenustatyta, bet svarbus yra pirmenybinės rankos stiprumas (Corballis et al., 2008; Crow et al., 1998) ir trečioji, kuri teigia, jog stiprūs kairiarankiai, stiprūs dešiniarankiai arba žmonės, kurie neturi rankos pirmenybės gauna žemesnius balus kognityvinėse užduotyse, nei žmonės pasižymintys vidutine rankos preferencija (Peters et al., 2006).

Apibendrinus rankiškumo, lateralizacijos ir kognityvinių funkcijų tyrimus, gauti rezultatai yra nenuoseklūs ir sunku nustatyti kaip rankiškumas, smegenų pusrutulių asimetrija ir kognityvinių užduočių atlikimas priklauso vienas nuo kito. Taip pat, rankiškumo metodologinis vertinimas gali turėti įtakos rezultatams: jis gali būti apibrėžiamas kaip pirmenybės teikimas rankai, rankos įgūdžiai, rankos jėga ir kiti rodikliai. Tačiau nei viena iš pagrindinių tyrimų tendencijų neatitinka J. Levy rezultatų (Levy, 1969).

1.2. Kalba

Kalbos apdorojimas smegenyse yra išskirtinis žmonių rūšies bruožas. Per pastaruosius dešimtmečius žinios apie kalbos neurobiologinį pagrindą žymiai išaugo. Buvo nustatytos skirtingos smegenų sritys kairiajame ir dešiniajame pusrutulyje, kurios palaiko tam tikras kalbos funkcijas. Parodyta, jog tinklai, apimantys smilkininę ir apatinę kaktinę žievę su aiškia kairiojo smegenų pusrutulio lateralizacija, atsakingi už sintaksinius procesus, o mažiau lateralizuoti smilkininiai - kaktiniai tinklai – už semantinius procesus (Friederici, 2011).

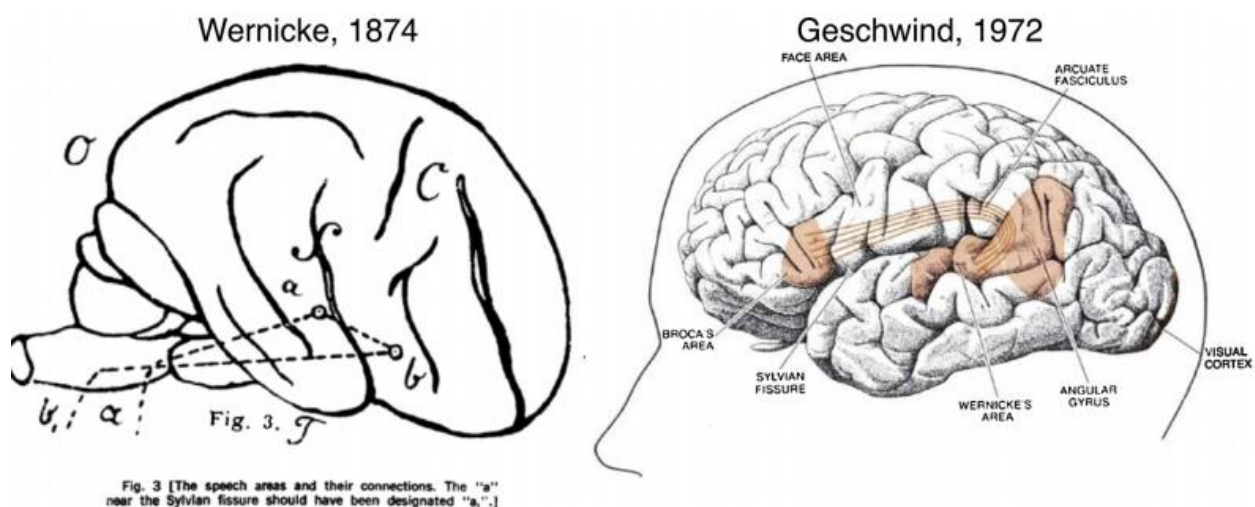
1.2.1. Kalbos centrai ir apdorojimo vieta

Yra išskiriami du pagrindiniai kalbos centrai – Broca sritis, atsakinga už kalbos formavimą ir Wernicke sritis, atsakinga už kalbos dekodavimą.

Prancūzų neurologas ir antropologas Paul Broca dar 1961 m. tirdamas savo pacientą atrado, jog pažeidus kairiajame smegenų pusrutulyje esantį apatinį kaktinį vingį yra paveikiama artikuliacinė žmogaus kalba (Broca, 1861). Nuo to laiko ši sritis buvo vadinama Broca sritimi, o artikuliacinis kalbos sutrikimas – Broca afazija.

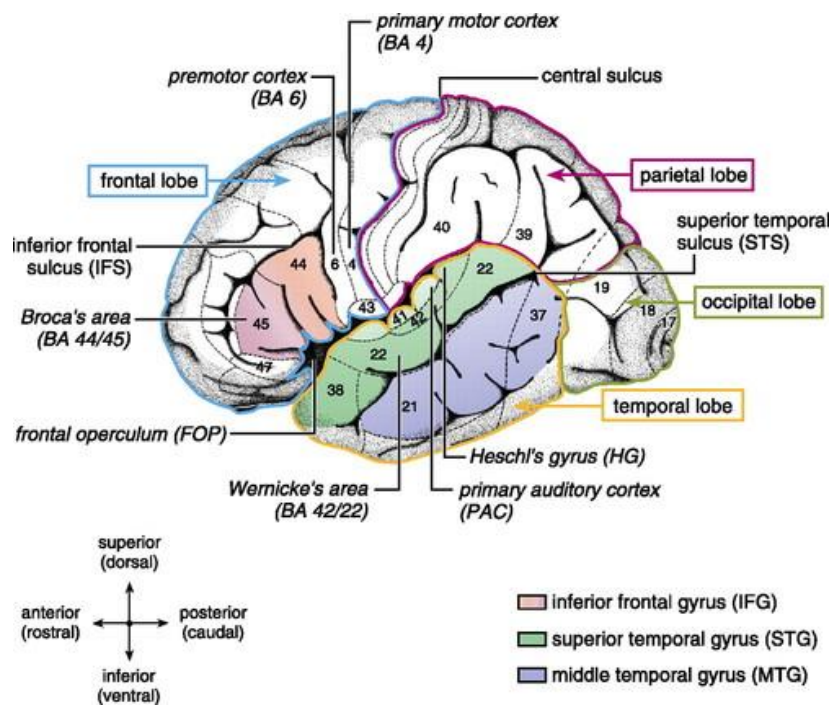
Praėjus 13 m. po Broca atradimo vokiečių mokslininkas Carl Wernicke aprašė du visiškai skirtingus afazijos atvejus, susijusius su kalbos supratimu ir sklandžia kalba. Atlikęs pacientų smegenų autopsiją, Wernicke nustatė, jog yra pažeista kairiojo smegenų pusrutulio viršutinis smilkininis vingis, dabar vadinamoji Wernicke sritis. C. Wernicke įtraukė Broca atradimus ir pasiūlė idėją, kad kalbos funkcijos gali būti sutrikdytos pažeidus jungiamuosius kelius tarp Wernicke ir Broca sričių (pvz.: viršutinis išilginis pluoštelis, angl. *Superior longitudinal fasciculus*), kuriais yra perduodama informacija tarp šių dviejų sričių. Šis Wernicke kalbos modelis

buvo modifikuotas Lichtheimo ir atnaujintas Geschwind (1972) bei ilgai naudojamas literatūroje kaip pagrindinis kalbos modelis (1.3. pav.)



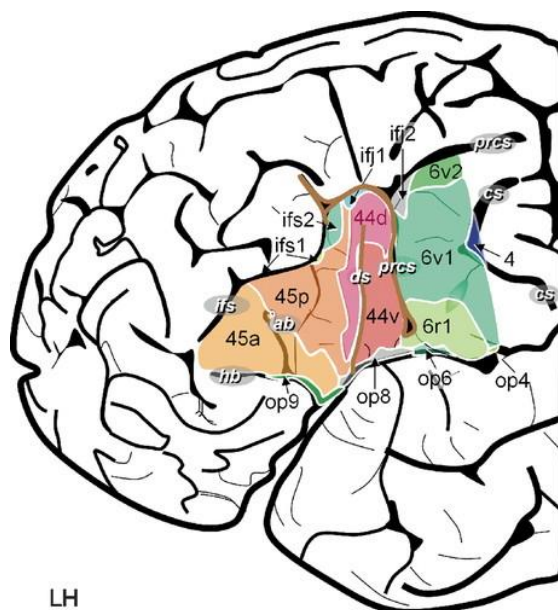
1.3. pav. Originalus Wernicke pasiūlytas kalbos modelis, 1874 m., dėl nežinomų priežasčių modelis pavaizduotas dešiniajame pusrutulyje. Dešinėje – atnaujintas Geschwind modelis, 1972 m. Šiame paveiksle, remiantis daugeliu anatominių apibrėžimų, viršutinis smilkininis vingis netyčia neteisingai pažymėtas kaip kampinis vingis (Tremblay & Dick, 2016).

Iš naujesnių skirtingų apžvalgų aišku, jog kalbai aktuali žievė apima Broca sritį (apatiniame kaktiniame vingyje, angl. *inferior frontal gyrus*, IFG), Wernicke sritį (viršutiniame smilkininiame vingyje, angl. *superior temporal gyrus*, STG), taip pat vidurinį smilkininį vingį (angl. *middle temporal gyrus*, MTG), apatinį momeninį (angl. *inferior parietal*) ir kampinį vingį (angl. *angular gyrus*) momeninėje skiltyje (angl. *parietal lobe*). Šiuose makroanomiškai apibrėžtose srityse galima išskirti ir mikroanatomines subsritis (Friederici, 2011) (1.4. pav.).



1.4. pav. Kairiojo pusrutulio anatominės ir citoarchitektoninės struktūros (Friederici, 2011).

Mikroanatominės sritys skirstomos atsižvelgiant į kalbai svarbių žievių citoarchotektoniką ir receptorinę architektoniką. Citoarchotektoniškai Broca sritis susideda iš Brodmano srities (angl. *Brodman area*, BA) 44 – gaubiančiosios dalies (angl. *opcular part*) ir BA45 – trikampės dalies (angl. *triangular part*). Pagal receptorinę architektoniką BA 45 sritį galima padalinti į priekinę 45a sritį, besiribojančią su BA47, ir užpakalinę sritį 45p, besiribojančią su BA44 (1.5. pav.). Brodmano 44 sritis gali būti dalinama į užpakalinę (44d) ir ventralinę (44v) sritis (Amunts et al., 2010).



1.5. pav. Kairiojo smegenų pusrutulio receptorinė architektonika (Amunts et al., 2010)

Kalbos tyrimai atkleidė, kad šios mikroanatominės sritys yra svarbios funkciškai. Gaubiančioji dalis BA44 yra ypač susijusi su sintaksiniu apdorojimu (Vigneau et al., 2006), o trikampė dalis BA45 yra aktyvinama kuomet apdorojami sintaksiniu požiūriu sudėtingi sakiniai (Rogalsky et al., 2008). Kiti tyrimai parodė, jog BA44 aktyvuojama kalbos generavime (Indefrey et al., 2001) ir supratime (Friederici et al., 2006). S.Newman su kolegomis (2010) nustatė, jog BA44 ir labiau priekinė BA45 sritis aktyvuojama suvokiant sakinius.

Jei su gimtosios kalbos lateralizacija ir apdorojimo procesu yra atlikta daug tyrimų ir apdorojimo centrai yra aiškūs, naujų kalbų mokymasis yra kompleksinis procesas, kuris, neapsiriboja vienu smegenų pusrutuliu, bet apima informacijos keitimąsi tarp kairiojo ir dešiniojo smegenų pusrutulio (Kennedy, 2006).

1.2.2. Naujai išmokstamų kalbų lateralizacija

Naujos kalbos išmokimas apima leksikos atsiminimą, fonologijos mokymąsi, ortografiją, sintaksę ir pragmatiką. Su šiais skirtingais elementais siejama skirtingų smegenų sričių aktyvacija. Leksikos atsiminimui yra aktyvuojamos kaktinė (angl. *frontal*) ir momeninė (angl. *parietal*) žievės sritys, fonologijai – kaktinės ir smilkininės (angl. *temporal*) sritys, pakaušinės (angl. *occipital*) ir smilkininės momeninės (angl. *temporal – parietal*) sritys – ortografijai, kaktinės ir požievinės (angl. *subcortical*) sritys – sintaksei. Taip pat, yra įtraukiama ir didžioji smegenų jungtis, kuri perduoda informaciją tarp dviejų smegenų pusrutulių. Be šių kompleksinių dalykų, smegenų dalys, kurios yra aktyvuojamos antrajai kalbai skiriasi, priklausomai nuo amžiaus, kuomet ji buvo išmokta. Vaikų, kurie anksti išmoksta antrąją kalbą, smegenų aktyvacija antrajai kalbai yra panaši kaip ir gimtosios kalbos, o besimokant jos suaugus – antrosios kalbos lateralizacija gali skirtis. Tai rodo, jog kalba lateralizuojasi skirtingai smegenyse, skirtingais žmogaus gyvenimo laikotarpiais, o tai reiškia, jog kalbos įgijimo ir apdorojimo struktūros nėra fiksuotos ir keičiasi priklausomai nuo žievės adaptacijos, kai nauja kalba yra išmokstama (Kennedy, 2006).

Pasitelkiant MRT buvo tirti vienkalbiai, ankstyvieji dvikalbiai (kurie antrąją kalbą išmoko iki 5 m.) ir vėlyvieji dvikalbiai (kurie antrąją kalbą išmoko 10 – 15 m.) žmonės. Tyrimo rezultatai atskleidė, jog dvikalbiai pasižymėjo didesniu pilkosios medžiagos tankiu apatinėje momeninėje žievėje lyginant su vienkalbių žmonių grupe. Šis skirtumas buvo statistiškai reikšmingas kairiajame smegenų pusrutulyje, ta pati tendencija buvo matoma ir dešiniajame pusrutulyje. Nors pilkosios medžiagos padidėjimas buvo matomas tiek ankstyvuosiuose, tiek vėlyvuosiuose dvikalbiuose tiriamuosiuose, tačiau efektas buvo stebimas ankstyvųjų dvikalbių grupėje (Mechelli et al., 2004).

Kitame tyrime pasitelkiant MRT buvo matuotas didžiosios smegenų jungties tūris ir 13 kitų dominančių regionų (įtrauktų į kalbos apdorojimą ir dvikalbių kognityvines funkcijas) žievės storio asimetrija tarp dvikalbių (ispanų – anglų) žmonių grupės ir vienkalbių (n = 39 kiekvienai

grupei). Priekinės juostinės žievės storis dešinėje buvo didesnis lyginant su kairiąja puse dvikalbiuose žmonėse ir atvirkščiai vienkalmuose. Taip pat, priekinė ir centrinė didžiosios smegenų jungties dalys buvo didesnės dvikalbiuose žmonėse. Tai rodo, jog struktūrinė organizacija tarp pusrutulių yra priklausomi nuo kalbos patirties (Felton et al., 2017).

Taip pat, pastebėta, jog antrosios kalbos mokėjimo lygis (angl. *proficiency*) turi įtakos smegenų aktyvacijos skirtumams tarp gimtosios ir antrosios kalbos. Dvikalbių, kurie pasižymi geresniu antrosios kalbos mokėjimu, smegenų aktyvacija skaitant yra labai panaši į gimtosios kalbos (ypač kairiojo smegenų pusrutulio vidurinis kaktinis vingis, angl. *middle frontal gyrus* – MFG), lyginant su blogiau antrąją kalbą mokančiais žmonėmis (Cao et al., 2013; Gao et al., 2017).

Kai kurie autoriai teigia, jog kalbos įgūdžiai visiškai išsivysto brendimo laikotarpiu (Locke & Bogin, 2006), o kiti tvirtina, jog 6 – 7 metų laikotarpis yra kritinis, nes po šio amžiaus išmokti kai kuriuos kalbinius įgūdžius yra sudėtinga (Johnson & Newport, 1989). Šią ribą mokslininkai pasirenka būtent dėl to, kad smegenys yra beveik suaugusio žmogaus dydžio, daugelis mielinizacijos procesų yra baigti ir atminties sistema yra susiformavusi kaip suaugusio žmogaus. Iki šio amžiaus vaikai įgyja kalbinius įgūdžius per implicitinę atmintį, taigi šie įgūdžiai yra beveik nesąmoningai, lengvai įsisavinami bei automatiškai pritaikomi (Ullman, 2006). Augant, implicitinė atmintis tampa ne tokia lanksti, todėl vėlesniame amžiuje išmokti kalbiniai įgūdžiai labiausiai palaikomi eksplicitinės atminties, įtraukiant sąmoningo apdarorojimo reikalaujančius procesus. Labiausiai implicitinės atminties paveikiamos kalbos sudėtinės dalys, tokios kaip gramatika ir fonologija. Tuo tarpu, leksika priklauso nuo eksplicitinės atminties talpos, kalbos mokėjimo ir naudojimo masto (Ruben, 1997; Ullman, 2001).

Kalbos procesas neišvengiamai apima ir darbinės atminties funkcijas, ypač sakiniai ir sudėtingos sintaksinės struktūros. Yra pateikiami neuroanatominiai įrodymai, atskleidžiantys ryšį tarp sintaksinių procesų ir darbinės atminties, tačiau dinaminis ryšys dar nėra nustatytas (Makuuchi & Friederici, 2013).

1.3. Atmintis

Atmintis – viena iš svarbiausių ir pagrindinių smegenų funkcijų, kuomet informaciją, kuri gaunama iš aplinkos yra įsimenama, išlaikoma ir atgaminama. Pagal informacijos išlaikymo trukmę atmintis skirstoma į jutiminę (sensorinę), ilgalaikę ir trumpalaikę ir darbinę, kuri dažnai yra priskiriama trumpalaikėi (Camina & Güell, 2017).

1.3.1. Atminties tipai

Sensorinė atmintis – tai gana automatinė ir labai trumpalaikė atminties forma jutimo organams apdorojant gaunamą informaciją kol ji atpažįstama ir gali būti perkeliama į trumpalaikę atmintį. Ši atmintis turi labai ribotą saugojimo trukmę, dažniausiai mažiau nei 1 sekundę (Tripathy

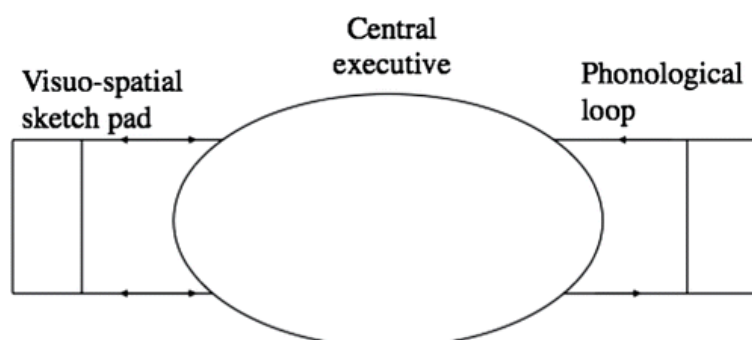
& Ögmen, 2018). Sensorinė atmintis leidžia išsaugoti juslinius įspūdžius pasibaigus pirminiam dirgikliui. Po to, informacija gali būti perkeliama į trumpalaikę atmintį (Coltheart, 1980).

Ilgalaikė atmintis yra neribotas informacijos, žinių, ankstesnių įvykių saugojimas. Ji gali trukti pora minučių arba visą gyvenimą. Ilgalaikė atmintis yra skirstoma į deklaratyvią (eksplicitinę) ir nedeklaratyvią (implicitinę, procedūrinę). Deklaratyvioji atmintis yra dar skirstoma į epizodinę, kuri saugo asmeninę patirtį, ir semantinę – saugo informaciją apie faktus (Dickerson & Eichenbaum, 2010). Procedūrinė atmintis apima visus nesąmoningus prisiminimus, taip pat tam tikrus gebėjimus ar įgūdžius. Deklaratyvi atmintis priklauso nuo hipokampo, t.y. kodavimas ir atgaminimas reikalauja hipokampo. Deklaratyvios atminties konsolidacija vykdoma lėtų bangų miego metu, kartojant neuronų aktyvumą, kurie reprezentuoja naujai įsimintą informaciją. Konsolidacijos metu reprezentacijos paskirstomos po žievės neuronų tinklus dienų, savaitių ar mėnesių eigoje ir toliau išlieka kaip ilgalaikės atminties pėdsakai. Tuo tarpu, procedūrinė atmintis – sąlyginai nuo hipokampo nepriklausanti. Tačiau tikėtina, kad hipokampus reikalingas formuojant nuo hipokampo nepriklausomą ilgalaikę atmintį miego metu. Deklaratyvi atmintis saugoma hipokampe ir naujojoje žievėje, o procedūrinė – motorinėje žievėje, smegenėlėse ir dryžuotajame kūne (Sawangjit et al., 2018).

Trumpalaikė atmintis – galimybė išlaikyti, bet ne manipuluoti, nedidelį kiekį informacijos, kuri yra aktyvi ir lengvai prieinama trumpą laiko tarpą (20–30 s). Tuo tarpu darbinė atmintis – trumpą laiko tarpą išsaugo informaciją ir galima ja manipuluoti.

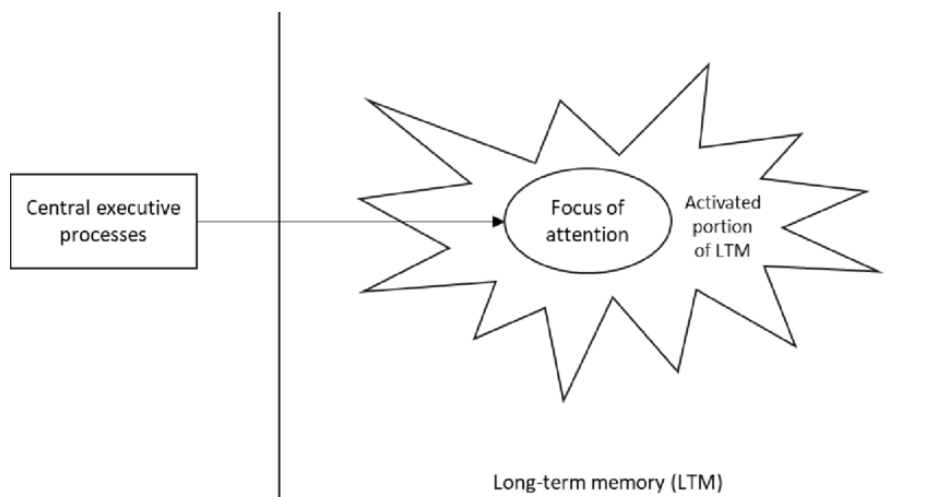
1.3.2. Darbinė atmintis

Darbinės atminties modelis teigia, kad priešingai nei paprastos trumpalaikės atminties, kuri suteikia trumpalaikį informacijos saugojimą, darbinė atmintis yra daugiakomponentė sistema, manipuluojanti informacijos saugojimu siekiant didesnio ir sudėtingesnio kognityvinio naudingumo. Trys susiję darbinės atminties komponentai yra žodinė darbinė atmintis, vaizdinė – erdvinė atmintis ir centrinis komponentas – dėmesio valdymas (Baddeley & Hitch, 1974; Baddeley, 2000) (1.6. pav.).



1.6. pav. Baddley sukurta darbinės atminties trijų komponentų sistema

Pasak N. Cowan (2008), darbinė atmintis gali būti suprantama kaip trumpalaikio informacijos saugojimo komponentas, kurio talpa labai priklauso nuo dėmesio ir kitų centrinių vykdomųjų procesų, kurie naudojami informacijos saugojime arba sąveikauja su ilgalaikės atmintimi. Ilgalaikės, trumpalaikės ir darbinės atminties sąsają galima pateikti hierarchiškai: ilgalaikės atminties srityje yra tarpinis aktyvuotas ilgalaikės atminties pogrupis (kuris tuo pačiu yra ir trumpalaikės atminties komponentas), o darbinė atmintis priklauso nuo aktyvuotos ilgalaikės atminties pogrupio. (Cowan et al., 2018) (1.7. pav.).



1.7. pav. N. Cowan darbinės atminties modelis (Cowan, 2008).

Vizualinė darbinė atmintis tai vaizdinės informacijos išsaugojimas nuo vienos fiksacijos iki kitos. Vizualinėje darbinėje atmintyje yra saugojama ne tik padėtis, bet ir tam tikrų abstrakčių formų, spalvų ir tekstūros informacija. Dažniausiai ji apsiriboja 3 – 5 objektais, priklausomai nuo užduoties. Informacija regimojoje darbinėje atmintyje yra saugoma 1 – 2 sekundes (Cowan, 2001).

1.3.3. Vizualinės darbinės atminties talpa

Vizualinės darbinės atminties talpa reiškia vaizdinės informacijos kiekį, kuris yra saugomas darbinėje atmintyje ir yra lengvai prieinamas atliekant užduotis (Luck & Vogel, 2013). Sveikiems jauniems suaugusiems VWM talpos riba yra maždaug trys paprasti objektai. Kai kurie tyrėjai teigė, jog ankstyvaisiais gyvenimo metais VWM talpa yra panaši į suaugusiųjų (Oakes et al., 2006; Ross-Sheehy et al., 2011), tuo tarpu kiti mokslininkai teigė, jog VWM talpos pajėgumas gali vystytis ir po paauglystės (Riggs et al., 2011; Sander et al., 2011). Visgi dabar yra manoma, kad VWM pajėgumas vaikystėje nėra panašus į suaugusiųjų ir nuolat vystosi bent pirmaisiais paauglystės metais. Paauglystės laikotarpyje smegenyse vyksta didžiuliai struktūriniai pokyčiai (Raznahan et al., 2011). Žievės sritys, tokios kaip momeninė ir prefrontalinė žievė, dalyvaujančios darbinės atminties procesuose, rodo brendimo pokyčius paauglystėje. Brendimo metu ypač

keičiasi prefrontalinė žievės storis, pilkosios medžiagos tankis ir baltosios medžiagos anizotropija (Lenroot & Giedd, 2006; Mabbott et al., 2006; Sowell et al., 2004).

Vienas populiariausių metodų atminties talpos nustatymui – pokyčių aptikimo metodas. Užduoties metu dalyviai trumpai (~ 100 – 500 ms) žiūri į paprastų vaizdinių masyvą ir įsimena šiuos elementus trumpam laikui (~ 1 – 2 s). Dalyviams užduoties metu reikia pasakyti, ar pateikiami vaizdiniai yra tokie patys, kuriuos prisimena iš ankstesnio stimulo, ar skiriasi (Cowan, 2001).

1.3.4. Darbinės atminties lateralizacija

Darbinės atminties lateralizacijos tyrimai buvo atliekami atskiriant verbalinę darbinę atmintį ir vizualinę darbinę atmintį. Buvo išskirta, jog verbalinė ir akustinė informacija aktyvuoja Broca ir Wernicke sritis, tuo tarpu vizualinė – erdvinė informacija aktyvuoja dešinįjį smegenų pusrutulį (Tulving & Craik, 2000). Daugelis tyrimų parodė, jog kaktinis momeninis tinklas, apimantis dorsolateralinę prefrontalinę žievę (angl. *dorsolateral prefrontal cortex* – DLPFC), priekinę juostinę žievę (angl. *anterior cingulate cortex* – ACC) ir momeninę žievę (angl. *parietal cortex* – PAR), yra darbinės atminties neuroninis tinklas (Chein et al., 2011; Kim et al., 2015; Osaka et al., 2003; Owen et al., 2005). DLPFC yra įtraukiama į užduotis, kuriose reikalinga informacijos integracija priimant sprendimus (Jimura et al., 2018; Kim et al., 2015), palaikant ir manipuluojant/atkuriant saugomą informaciją (Moore et al., 2013; Osaka et al., 2003) ir informacijos atnaujinimui (Murty et al., 2011). Tuo tarpu ACC veikia dėmesio kontrolę, įvertinant informacijos koregavimo ir pritaikymo poreikius pagal užduočių reikalavimus (Osaka et al., 2003). O momeninė žievė laikoma jutimo ar suvokimo apdorojimo vieta (Andersen & Cui, 2009; Owen et al., 2005).

Nerviniai pokyčiai senstant, tokie kaip pilkosios ir baltosios medžiagos mažėjimas parietalinėse ir priekinėse smegenų srityse, daro įtaką darbinei atminčiai. Brown ir Jaffe (1975) sukurtas RHAM modelis teigia, jog dešiniajame pusrutulyje ir su juo susijusiose funkcijose pastebimas greitesnis nykimas, palyginti su kairiuoju pusrutuliu. Atitinkamai, vizualinės erdvinės užduotys, kurios yra labiau lateralizuotos dešiniajame pusrutulyje, labiau paveikiamos senėjimo proceso, nei žodinės, kurios lateralizuotos kairiajame pusrutulyje (Brown & Jaffe, 1975). R. Cabeza (2002) sukūrė HAROLD modelį, kuris rodo, kad vyresnio amžiaus žmonių pusrutulių skirtumai yra mažesni, palyginti su jaunesniais suaugusiais žmonėmis. Šį modelį patvirtino keli fMRT ir PET tyrimai atliekant darbinės atminties užduotis tiek su žodiniais, tiek su erdviniais dirgikliais (Dixit et al., 2000; Reuter-Lorenz et al., 2000). Šis lateralizacijos su amžiumi mažėjimas yra siejamas su papildomu nedominuojančio pusrutulio įdarbinimu, siekiant kompensuoti su amžiumi susijusį pablogėjimą dominuojančiame pusrutulyje (Cabeza, 2002).

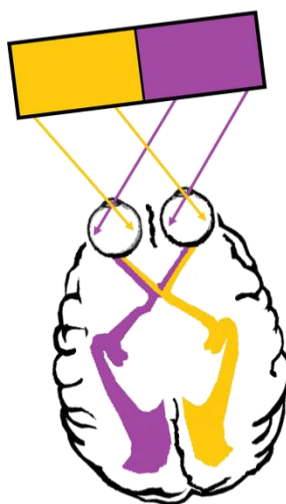
Per pastarąjį dešimtmetį daugelyje elektrofiziologinių regimosios darbinės atminties tyrimų buvo naudojamos ir paradigmos, kuriose stimulai yra pateikiami bilateraliai abiem pusrutuliams ir rėmėsi tuo, jog kontrolateralinis regos sistemos organizavimas lemia tai, kad stimulai pirmenybiškai apdorojami kontralateraliniuose pusrutuliuose (Sander et al., 2019). Kai informacija yra pateikiama bilateraliai (t.y. abu smegenų pusrutuliai gauna informaciją), dalyviai įsimena stimulą viename iš smegenų pusrutulių, o pusrutulių aktyvumo skirtumus galima priskirti su atmintimi susijusiems procesams. Su įvykiu susijusių potencialų tyrimo metodu, įrodyta, jog VWM užduoties metu, su darbine atmintimi siejamas komponentas - uždelimo skirtumas tarp pusrutulių (CDA angl. *contralateral delay activity*), skiriasi priklausomai nuo objektų skaičiaus, kuris yra išlaikomas vizualinėje darbinėje atmintyje (Luck & Vogel, 2013; Vogel & Machizawa, 2004). Komponento amplitudė didėjo, didėjant stimulų kiekiui ar užduoties sudėtingumui, tačiau iki tam tikros ribos, t.y. iki vizualinės darbinės atminties talpos. Pavyzdžiui, CDA buvo beveik identiškas įsimenant 4 ir 8 stimulus, kurie jau viršija VWM talpą (Vogel & Machizawa, 2004). Taip pat, buvo pastebėta, jog vyresnių žmonių CDA amplitudė sumažėja arba yra mažiau moduluojama atminties apkrovos (Wiegand et al., 2014, 2018).

1.4. Smegenų lateralizacijos metodai

Anksčiau kalbos sričių smegenyse nustatymui buvo taikomas Wada testas, kuris buvo laikomas vienu tiksliausių nustatymų būdu. Wada testo metu tiriamajam į vidinę miego arteriją buvo suleidžiamas natrio amitalis ir taip laikinai anestezuojamos smegenys aplink vidinę miego arteriją. Pasireiškus hemiparezei, kurią patvirtindavo EEG matavimai būdavo taikomi įvairūs kalbos ir atminties testai (Bi et al., 2016). Šiais laikais modernesni neinvaziniai metodai, tokie kaip funkcinis magnetinis rezonansas ar funkcinė transkranijinė Doplerio sonografija leidžia nustatyti, kuris pusrutulis dominuoja kalbos apdorojime ir atskleidžia pusrutulių dominavimo modelių variacijas (Deppe et al., 2004; Pelletier et al., 2007). Bet visi šie metodai yra brangūs ir nėra lengvai prieinami visiems tyrėjams. Todėl vis daugiau dėmesio skiriama į paprastesnius, pigesnius, prieinamesnius didelėms žmonių imtims metodus. Vizualinės pusės lauko (VHF) paradigma sudaro sąlygas lengvai prieinamam lateralizacijos tyrinėjimui (Bourne, 2006).

1.4.1. Pusės regos lauko paradigma

Pusės regos lauko paradigma remiasi tuo, jog stimulus trumpai (< 150 ms) pateiktas į vieną regos lauką (dešinįjį arba kairįjį) yra apdorojamas priešingo smegenų pusrutulio, t.y. kairiajame regos lauke pateiktas dirgiklis yra apdorojamas dešiniojo smegenų pusrutulio, o dešiniajame regos lauke pasirodęs vizualinis stimulus pirmiausiai yra projektuojamas kairiajame smegenų pusrutulyje (1.8. pav.). Paradigma remiasi prielaida, kad pateikus stimulą į dominuojantį pusrutulį tiriamasis darys mažiau klaidų ir reakcijos laikas bus trumpesnis (Bourne, 2006).



1.8. pav. Vizualinio lauko projekcijos galvos smegenų pusrutuliuose.

Pusės regos lauko paradigma pradžioje buvo naudojama kaip paprasta, neinvazinė ir pigi kalbos procesų lokalizavimo procedūra pacientams, pasižymintiems vieno smegenų pusrutulio pažeidimais (Gazzaniga et al., 1965). Nors VHF paradigma turi daug teigiamų aspektų, ji buvo kritikuojama dėl galimai netikslių išvadų, prieinamų ją naudojant ir individualių kalbos lateralizacijos skirtumų (Krach et al., 2006).

Vis dėlto, jei tyrimai, naudojantis VHF paradigma yra atliekami tinkamai, jų metu gaunami lateralizacijos indeksai teigiamai koreliuoja su lateralizacijos indeksais gautais naudojant funkcinio magnetinio rezonanso (fMRT) metodą (Hunter & Brysbaert, 2008). Z.R.Hunter ir M. Brysbaert savo eksperimente naudojo VHF paradigmą vaizdinių ir žodžių įvardinimui. Po šios užduoties 10 tiriamųjų buvo atrinkti fMRT užduočiai: 6 dalyviai, kurie pasižymėjo ryškiu RVF pranašumu, 2 – kurie rodė aiškų LVF pranašumą ir 2 dalyviai, kuriuose nebuvo aptikti reikšmingi skirtumai tarp dešiniojo ir kairiojo regos laukų. fMRT registracijos metu tiriamieji turėjo išvardinti kiek įmanoma daugiau žodžių prasidedančių iš 10 raidžių, kuriomis dažniausiai prasideda žodžiai. VHF užduoties rezultatai ir fMRT užduoties lateralizacijos indeksai teigiamai koreliavo tarpusavyje (vaizdinių įvardinimo VHF $r = 0,77$; $p < 0,01$; žodžių įvardinimo VHF $r = 0,63$; $p < 0,01$) (Hunter & Brysbaert, 2008). Tokios tyrimo išvados paskatino vis plačiau ir rimčiau naudoti VHF paradigmą teorinėse ir klinikinėse srityse.

Naudojant VHF paradigmą, galima gauti skirtingus rezultatus, kurie priklauso nuo metodikos. D. Boles (1990) savo tyrimuose pastebėjo, jog didesni ir stabilesni skirtumai tarp lateralizacijos indeksų buvo stebimi, kuomet du skirtingi stimuli buvo pateikiami vienu metu tiek į kairįjį, tiek į dešinįjį regos laukus, nei tuo metu, kai stimulus buvo pateikiamas arba į RVF arba į LVF. Abu stimuli turi konkuruoti vienas su kitu. Dar vieni svarbūs metodikos aspektai – žvilgsnio fiksacija ir stimulų pateikimas ne mažiau kaip 1° atstumu nuo žvilgsnio fiksacijos vietos,

siekiant užtikrinti vienašalę projekciją. Labai svarbu, kad stimulai būtų pateikiami parafovealiniu būdu (iki 5° regėjimo kampo) ir būtų trumpi, nes regėjimo aštrumas staigiai krenta nuo žvilgsnio fiksavimo vietos ir tiriamasis nukreips žvilgsnį į vieną arba kitą pusę (Boles & Barth, 2011). Todėl yra priimta, jog stimulo pateikimas turėtų trukti iki 150 ms, norint išvengti akių judesių link jo. Atsižvelgiant į šiuos metodikos aspektus, VHF paradigma gali būti naudojamas kaip patikimas metodas kalbos funkcijų lokalizacijų tyrimuose (Boles, 1994).

2. METODIKA

2.1. Dalyviai

Tyrimė dalyvavo 112 dalyvių (44 vyrų), pakviestų naudojantis socialiniais tinklais, asmeniniais kontaktais bei skelbimais Vilniaus universitete. Visi dalyviai pasižymėjo normaliu arba koreguotu iki normalaus (korekciniai akiniai, lęšiai) regėjimu. Dalyviai turėjo pateikti informaciją apie vaistinių preparatų ar narkotinių medžiagų (gydomaisiais ar rekreaciniais tikslais) vartojimą/nevartojimą per pastaruosius tris mėnesius iki tyrimo. Tiriamieji tokia eksperimente dalyvavo pirmą kartą ir apie jo tikslus nežinojo. Prieš eksperimentą, kiekvienas dalyvis pasirašė sutikimą dalyvauti tyrime.

2.2. Klausimynai

2.2.1. Demografinis klausimynas

Pirma, dalyviai turėjo užpildyti demografinį klausimyną, kuriame pateikė informaciją apie savo amžių, lytį, regą, dabartinę sveikatą ir būseną.

2.2.2. Rankiškumo vertinimas

Rankiškumui vertinti buvo naudotas Edinburgo rankiškumo klausimynas (angl. *Edinburgh handedness inventory*) (Oldfield, 1971). Dalyviai turėjo įvertinti rankos pasirinkimą vykdant dešimt įvairių veiklų, tokių kaip rašymas, žirklių laikymas, dantų valymas ir pan. Tiriamieji rankos pasirinkimą įvertino vienu arba dvejais kryžiuokais. Vienas kryžiuokas reiškė teikiamą pirmenybę pasirinktai rankai, o du kryžiuokai rodė išimtinį tik pasirinktinės rankos naudojimą (kitos rankos nenaudos šiai veiklai, išskyrus tuos atvejus, kai nebus kitos galimybės) (Oldfield, 1971). Laterališkumo indeksas (LI) buvo apskaičiuotas taikant šią formulę:

$$LI = \left(\frac{\text{dešinės rankos kryžiuokų suma} - \text{kairės rankos kryžiuokų suma}}{\text{visų kryžiuokų suma}} \right) \times 100$$

Taigi, laterališkumo indekso balai svyravo nuo -100 iki 100, kur neigiamos reikšmės rodo kairiosios rankos dominavimą, o teigiamos reikšmės - dešinėsios rankos dominavimą.

2.2.3. Kalbos istorijos klausimynas (LHQ 3.0)

Kalbos istorijos klausimynas yra daugiakalbių žmonių ar besimokančiųjų kalbų įvertinimo priemonė (Li et al., 2019). Dalyviai turėjo užpildyti LHQ formą, kurioje pateikė informaciją apie savo kalbinę istoriją, t.y. kokiomis kalbomis šneka, nuo kelerių metų pradėjo jų mokytis, jų vartojimo dažnumą kasdieninėje veikloje. Nuoroda į LHQ 3.0 klausimyną: lhq3.herokuapp.com. Kadangi tyrimas skirtas anglų kalbos laterališkumo vertinimui, daugiausia dėmesio, analizuojant šio klausimyno duomenis, buvo skirta anglų kalbos lygio įvertinimui.

Iš klausimyne esančių klausimų buvo apskaičiuotas dalyvių anglų kalbos mokėjimas (angl. *proficiency*), imersija (angl. *immersion*), dominavimas (angl. *dominance*) ir kalbų įvairovės balas (angl. *multilingual language diversity score*). Kalbos mokėjimas buvo vertinamas pagal klausimyno 11 klausimą, kuriame dalyvių buvo prašoma įvertinti septynbalėje sistemoje kaip gerai moka kiekviena įvardinta kalba rašyti, skaityti, kalbėti ir klausyti. Imersija buvo apskaičiuota pagal 5 klausimą, kuriame dalyviams reikėjo nurodyti savo amžių, nuo kada pradėjo naudoti kiekvieną įvardintą kalbą rašyme, kalbėjime, klausyme ir skaityme. Pagal kalbos mokėjimą ir 14 – 15 klausimus (kuriuose tiriamieji įvardino kiek laiko praleidžia per dieną atlikdami įvairias veiklas, tokias kaip televizoriaus žiūrėjimas, skaitymas ir pan., kalbomis, kurias mokėsi ar išmoko, bei kiek valandų per dieną praleidžia bendraudami kiekviena kalba su jais supančiais žmonėmis), buvo apskaičiuojamas kalbos dominavimo balas (Li et al., 2019). Kalbų įvairovės balas buvo skaičiuojamas pagal kiekvienos įvardintos kalbos dominavimą ir jo įvertis suskirstė dalyvius į tris grupes:

- Jei įvertis 0 – dalyvis laikomas vienkaltiu;
- Jei įvertis 1 – dalyvis dvikalbis, tiek kalbos sklenda, tiek kalbos vartojimo dažnumu;
- Jei įvertis 2 – dalyvis daugiakalbis visomis kalbomis, kurias įvardino.

2.3. Translingvistinė leksinio sprendimo užduotis (TLDT)

Užduotis buvo sukurta J. Willemin et al. (2016) ir naudota vėlesniame tyrime (Hausmann et al., 2019). Šiuo metu, naudojant minėtą užduotį, yra vykdomas tyrimas tarptautiniu mastu. Naudojant identišką translingvistinę leksinio sprendimo užduotį įvairiose šalyse (kurių žmonių anglų kalbos lygis skiriasi), įskaitant ir Lietuvą yra atliekamas užsienio (anglų) kalbos lateralizacijos vertinimas. TLDT užduotyje yra naudojami angliški žodžiai ir raidžių rinkiniai nesudarantys jokie angliško žodžio. Užduotį sudaro šios stimulų kombinacijos: žodinis stimulus/ nežodinis stimulus (16 porų), nežodinis stimulus/ žodinis stimulus (16 porų), nežodinis stimulus/ nežodinis stimulus (32 poros) (2.1 lentelė).

Lentelė 2.1. Žodinių ir nežodinių stimulų poros, kurios buvo naudojamos TLDT užduotyje. Žodiniai stimulai yra paryškinti.

Stimulas 1	Stimulas 2
agenda	asenga
alibi	acipi
aura	aita
casino	caniso
film	fitz
gala	dara
garage	lapage

jazz	jaik
jury	jula
menu	besu
piano	pieni
radio	rapoo
snob	ssib
studio	slugio
taxi	taia
virus	gilus
lara	vata
sneg	snik
cadisy	canisi
eure	euta
janz	japt
beny	bevu
asanca	asande
gitus	giris
turnex	turmel
slougou	slougue
vavade	vavege
pueni	peani
juto	jula
taht	tawl
rageu	rapea
firl	fibm

2.3.1. TLDT užduoties atlikimas

Užduotį sudarė raidžių junginių stimulų poros. Visos raidės buvo parašytos juodu *Courier New* šriftu, mažosiomis raidėmis, 12 dydžiu ir pateikiamos baltame (rgb 255; 255;255) kompiuterio ekrane (ekrano įstrižainė 54 cm). Tyrimo metu kompiuterio ekrano viduryje buvo pateiktas žvilgsnio fiksavimo kryžiuokas, kurio trukmė – 1000 ms. Po jo išnykimo, dešiniajame ir kairiajame regos lauke 100 ms pasirodydavo raidžių junginių pora. Tuomet dalyviai turėjo 2000 ms laiko sprendimo priėmimui (2.1. pav.). Jei atsakymas nebuvo pateiktas, automatiškai pasirodydavo kita raidžių junginių pora. Kiekviena raidžių junginių kombinacija buvo pateikta po 4 kartus atsitiktine tvarka. Dalyviai turėjo sėdėti priešais kompiuterio ekraną 57 cm atstumu (atstumas tarp monitoriaus ir akių), kad 1 cm atitiktų 1° regėjimo kampą.

Tiriamųjų buvo prašoma kompiuterio klaviatūros mygtuko paspaudimu nurodyti, ar jie mato reikšmingą žodinį stimulą (anglišką žodį, turintį prasmę) dešiniame (dešinės rankos rodomuoju pirštu spausti mygtuką „J“) regos lauke, ar kairiame (kairės rankos rodomuoju pirštu spausti mygtuką „F“), ar nemato reikšmingo žodinio stimulo nei viename regos lauke (abiejų rankų nykščiais spausti „tarpo“ mygtuką). Prieš pagrindinį eksperimentą dalyviai turėjo atlikti 10 susipažinimo bandymų (juose naudojami stimulai nebuvo naudojami tikrojoje užduotyje). Eksperimente iš viso buvo atliekami 256 bandymai (64 – kuomet reikšmingas žodis buvo pateiktas kairiajame vizualiniame lauke, 64 – reikšmingas žodis, pasirodydavo dešiniajame vizualiniame

lauke ir 128 – reikšmingo žodžio nebuvo nei viename regos lauke). Eksperimento viduryje (t.y. po 128 bandymų) dalyviai galėjo padaryti pertrauką. Tyrimo pradžioje tiriamiesiems buvo akcentuojama stengtis viso eksperimento metu išlaikyti žvilgsnį į fiksavimo kryžiuoką, bei reaguoti ir priimti sprendimą kuo įmanoma greičiau. Atskirai įvertinome teisingų atsakymų skaičių bei reakcijos laiką, tiek kairiajame vizualiniame lauke (LVF, angl. *left visual field*), tiek dešiniajame (RVF, angl. *right visual field*). TLTD užduoties atlikimas užtruko 20 - 30 minučių.

2.4. Darbinės vizualinės atminties užduotis (VWM)

Darbinės vizualinės atminties užduotis buvo sukurta remiantis pokyčio atpažinimo paradigma (*change detection paradigm*) (Rajsic et al., 2019; Rouder et al., 2011) ir pateikiama naudojant „*E-prime profesional*“ programą. Užduotį sudarė nuo 3 iki 5 raidžių kombinacijos. Raidžių kombinacijos buvo sudaromos iš C, F, M, P, S, T, V ir K raidžių. Visos raidės buvo parašytos juodu *Sans – serif* šriftu, didžiosiomis raidėmis, kurių dydis – $\sim 0,34^\circ$ pločio ir $\sim 0,4^\circ$ aukščio ir pateikiamos pilkame (rgb 192; 192; 192) kompiuterio ekrane (ekrano įstrižainė 54 cm). Tyrimo metu kompiuterio ekrano viduryje buvo pateiktas žvilgsnio fiksavimo kryželis ($0,2^\circ \times 0,2^\circ$) ir virš jo esanti užuominos rodyklė ($0,8^\circ$ pločio ir $0,4^\circ$ aukščio), kuri rodydavo dešinę arba kairę puses, rodyklės pasirodymo trukmė – 100 ms. Po jos išnykimo, dešiniajame ir kairiajame regos lauke pasirodydavo nuo 3 iki 5 raidžių kombinacijos (abejuose regos laukuose raidžių kiekis buvo vienodas). Stimulai buvo atsitiktinai išdėstyti kairiajame ir dešiniajame regos laukuose įsivaizduojamuose apskritimuose, kurių spindulys buvo 2° ; $3,8^\circ$; $5,5^\circ$. Raidės, praėjus 500 ms, išnykdavo ir vėl pasirodydavo žvilgsnio fiksacijos kryželis ($t = 1000$ ms). Išnykus žvilgsnio fiksacijos kryželiui vėl pasirodydavo raidės ($t = 2000$ ms) ir tiriamajam reikėjo nuspręsti, ar tame vizualiniame lauke, kurį nurodė užuominos rodyklė, pasikeitė viena raidė, ar ne (2.1. pav.). Raidės būdavo pastoviose vietose ir pasikeisti galėjo tik viena raidė. Nepateikus atsakymo per 2000 ms užduotis automatiškai tęsdavosi toliau su kita raidžių kombinacija. Dalyviai turėjo sėdėti tiesiai prieš kompiuterio ekraną 57 cm atstumu.

Tiriamųjų buvo prašoma kompiuterio klaviatūros mygtuko paspaudimu nurodyti, ar įvyko raidės pasikeitimas užuominos rodyklės nurodytame vizualiniame lauke, ar ne. Jei raidė pasikeisdavo, dalyviams dešinės rankos rodomuoju pirštu reikėdavo paspausti mygtuką „J“, nepriklausomai nuo regos lauko pusės, kuriame įvyko raidžių pasikeitimas, o neįvykus raidžių pasikeitimui, kairės rankos rodomuoju pirštu paspausti mygtuką „F“. Prieš pagrindinį eksperimentą dalyviai turėjo atlikti 10 susipažinimo bandymų. Eksperimente iš viso buvo pateikti 240 bandymai (80 bandymų, sudarytų iš trijų raidžių stimulų, 80 – iš keturių raidžių ir 80 – iš penkių raidžių), užuominos rodyklė tiek į kairiąją, tiek į dešiniąją puses rodydavo po lygiai. Praėjus 120 bandymų, tiriamieji galėjo padaryti pertrauką nuo užduoties ir pailsėję ją tęsti toliau. Viso eksperimento metu tiriamiesiems buvo rekomenduojama stengtis išlaikyti žvilgsnį į

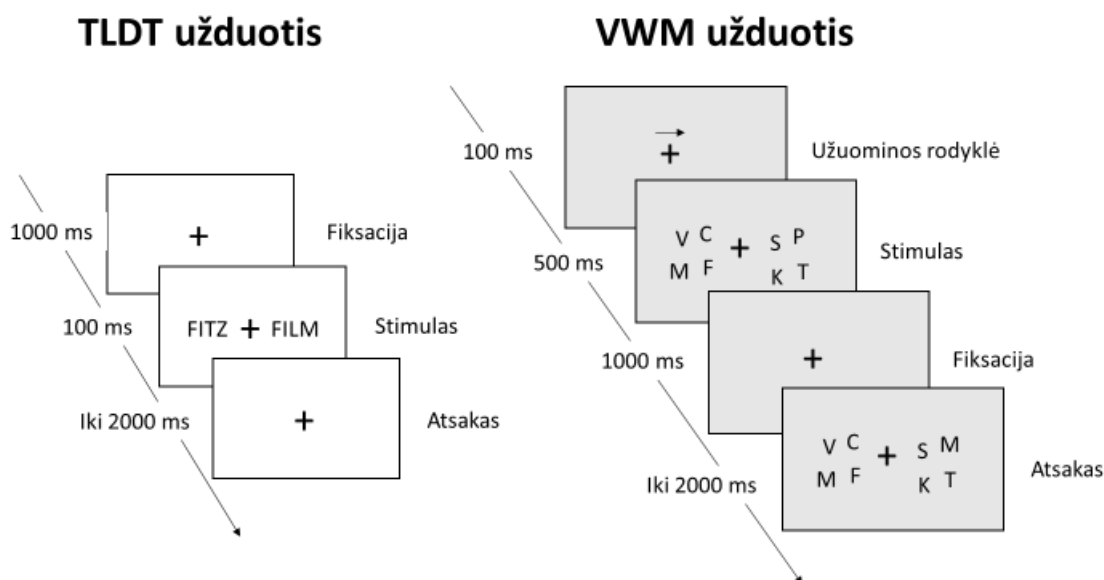
fiksavimo kryžiuką, bei pateikti atsakymą kaip įmanoma greičiau. Atskirai įvertinome užduoties atlikimo tikslumą, reakcijos laiką, tiek kairiajame vizualiniame lauke, tiek dešiniajame, bei apskaičiavome bendrą vizualinės darbinės atminties talpą. Vizualinės darbinės atminties talpa buvo skaičiuojama pagal formulę:

$$Talpa = \frac{p(\text{hit rate}) - p(\text{false alarm})}{1 - p(\text{false alarm})} * \text{set size},$$

kur *set size* yra naudotų stimulų raidžių kiekis, kuris varijavo nuo 3 iki 5; $p(\text{hit rate}) = \text{hit rate}/20$; $p(\text{false alarm}) = \text{false alarm}/20$. Ši užduotis užtruko apie 30 – 35 minutes.

2.5. Bendra viso eksperimento procedūra

Visi tiriamieji gavo informaciją apie tyrimą, užpildė raštiškus sutikimus, bei demografinį ir Edinburgo rankiškumo klausimynus. Gavę TLDT užduoties detalią instrukciją, tiriamieji galėjo užduoti klausimus, tačiau prasidėjus tyrimui buvo paprašyti netrukdyti kitiems tiriamiesiems, o baigus užduotį palaukti, kol visi dalyviai viename kambaryje (eksperimento kambaryje būdavo 1 – 4 dalyviai vienu metu) užbaigs užduotį. Po TLDT užduoties dalyviai turėjo įvertinti, ar pavyko atpažinti visus užduotyje pateiktus anglų kalbos žodžius ir kaip sekėsi išlaikyti žvilgsnį į fiksacijos kryželį viso eksperimento metu. Paskui dalyviai buvo supažindinti su vizualinės darbinės atminties užduoties instrukcija. Pabaigę VWM užduotį tiriamieji turėjo užpildyti kalbos istorijos klausimyną (2.1. pav.). Bendrai visas eksperimentas truko ~ 1,5 – 2 valandas.



2.1 pav. TLTD ir VWM užduočių apibendrinta schema.

3. DUOMENŲ ANALIZĖ

Iš analizės pašalinome 8 dalyvių duomenis dėl neatitikimo išsikeltiems tiriamųjų atrankos kriterijams, t.y. patyrę galvos traumų, turintys neurologinių sutrikimų ar vartojantys psichoaktyvias medžiagas. Tiriamųjų duomenys buvo neįtraukti į analizę atsižvelgiant į jų užduoties tikslumą. 5 tiriamųjų duomenys buvo pašalinti iš darbinės vizualinės atminties užduoties duomenų analizės dėl žemo rezultato, todėl VWM dalyje buvo analizuoti 99 tiriamųjų rezultatai (40 vyrų). Iš TLDT užduoties duomenų analizės buvo pašalinta 12 dalyvių, nes dominuojančiame regos lauke jų tikslumas nebuvo statistiškai reikšmingai didesnis už spėliojimo lygį arba nedominuojančiame regos lauke jų tikslumas buvo statistiškai reikšmingai mažesnis už spėliojimo lygį. (Markus Hausmann et al., 2019). Tolimesnei TLDT duomenų analizei liko 92 dalyviai (39 vyrų).

Užduočių rezultatų įvertinimui naudojome asimetrijos indeksą (AI), kuriam apskaičiuoti taikėme formulę:

$$\left[\frac{(RVF \text{ rezultatai} - LVF \text{ rezultatai})}{(RVF \text{ rezultatai} + LVF \text{ rezultatai})} \right] \times 100$$

Gautos reikšmės svyravo nuo -100 iki 100, reiškiančios tęstinumą kalbos lateralizacijoje tarp numatomo RVF/LH pranašumo ir netikėto LVF/RH pranašumo. Kitaip tariant, šis indeksas apibūdina laterališkumo kryptį: kuo pozityvesnė reikšmė – tuo didesnis RVF/LH pranašumas ir atvirkščiai, kuo neigiamesnė reikšmė – tuo didesnis LVF/RH pranašumas.

Duomenų statistinei analizei naudojome SPSS programą. TLDT ir VWM užduoties duomenų analizei, regimojo lauko efekto, lyties ir rankiškumo poveikis užduoties tikslumui ir reakcijos laikui buvo apskaičiuotas naudojant mišrios modelio kovariacijos analizę (ANCOVA), įtraukiant dalyvių rankiškumą kaip kovariantę, bei daugartinio palyginimo – Bonferroni testas post hoc analizei. Vertinant ryšį tarp TLDT ir VWM užduočių lateralizacijos indekso, atminties talpos ir TLDT lateralizacijos indekso ir užduoties atlikimo tikslumo, atminties talpos ir VWM lateralizacijos indekso naudojome *Pearson*'o koreliacijos koeficientą. Statistinio ryšio stiprumas tarp kintamųjų išreiškiamas koeficientu r , kurio reikšmė svyruoja nuo -1 iki 1. Jei $r = 0$ – priklausomybės tarp kintamųjų nėra, $r = 1/-1$ – kintamieji visiškai priklausomi. Norint įsitikinti, ar koreliacija nėra atsitiktinis sutapimas, buvo apskaičiuojama p reikšmė, kuri yra palyginama su reikšmingumo lygmeniu $\alpha = 0,05$.

4. REZULTATAI

4.1. Dalyviai

Po dalies dalyvių duomenų pašalinimo dėl neatitikimų kriterijų, VWM eksperimento analizėje buvo analizuojami 99 dalyvių duomenys, TLDT užduoties analizėje – 92, o bendroje VWM ir TLDT analizėje - 90 dalyvių duomenys. Jų amžiaus vidurkis buvo $21,79 \pm 2,45$ metai (amžius varijavo nuo 19 iki 27 metų). Pagal kalbos istorijos klausimą 1 dalyvis buvo priskirtas vienkaltųjų grupei, visi likę dalyviai buvo priskirti dvikalbių arba daugiakalbių grupei remiantis MLD įverčiui (4.1. lentelė).

Lentelė 4.1. Kalbos istorijos klausimyno įverčiai anglų kalbai.

Mokėjimas	Dominavimas	Imersija	MLD*
$0,81 \pm 0,16$	$0,64 \pm 0,11$	$0,47 \pm 0,11$	$1,44 \pm 0,3$

* *MLTD (angl. multilingual language diversity) – kalbų įvairovės balas.*

Dalyvių anglų kalbą vertinome pagal tris įverčius: mokėjimo, dominavimo ir imersijos. Jie buvo apskaičiuoti pagal LHQ 3.0 (žr. 2.2.3. sk.). kalbos istorijos klausimyno klausimus. Kalbos mokėjimo, dominavimo ir imersijos įverčiai galėjo varijuoti nuo 0 iki 1, kur 1 reiškia anglų kalbos mokėjimo, dominavimo, imersijos lygį panašų į gimtosios kalbos. MLD galėjo varijuoti nuo 0 iki 2. Tiriamieji gavę 0 buvo priskiriami vienkaltųjų grupei, 1 – dvikalbių ir 2 – daugiakalbių grupei.

Iš duomenų matome, jog mūsų dalyviai pasižymėjo geru ($0,81 \pm 0,16$) anglų kalbos mokėjimu, kuris buvo netoli mokėjimo lygio (1), panašiu į gimtosios kalbos. Imersijos balas ($0,47 \pm 0,11$) parodo, jog tiriamieji anglų kalbą žino/mokosi/naudoja perpus trumpiau nei gimtąją. Taip pat, tiriamieji pasižymėjo gan aukštu dominavimo balu ($0,64 \pm 0,11$), kuris parodo, jog į kasdienes veiklas jie dažnai įtraukia anglų kalbą.

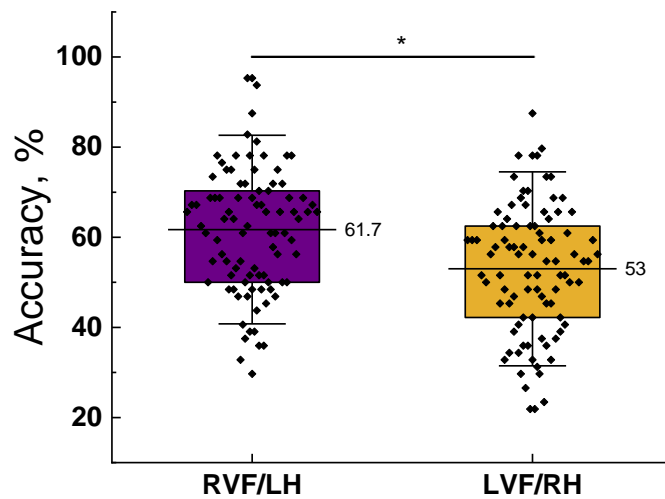
4.2. TLDT užduoties rezultatai

Tyrime buvo analizuotas reakcijos laikas, užduoties tikslumas, bei šių rodiklių priklausomybė nuo lyties. Dalyvių rankiškumas buvo įtraukiamas kaip kovariantė statistinėje analizėje.

4.2.1. TLDT atlikimo tikslumas

Įvertinus TLDT užduoties atlikimo tikslumą, matoma reikšminga regos lauko įtaka $F(1, 88) = 6,5224$; $p = 0,014$; $\eta^2 = 0,066$. Tuo atveju, kai žodinis stimulus buvo pateikiamas dešiniajame regos lauke, o informaciją apdorojo kairysis smegenų pusrutulis, užduoties atlikimo tikslumas (ACC %) buvo statistiškai reikšmingai didesnis ($ACC_{RVF} = 61,7$), nei tais atvejais, kai žodinis stimulus buvo pateikiamas kairiajame regos lauke ($ACC_{LVF} = 53,0$) (4.1. pav.). Lyties, sąveika tarp lyties ir regos lauko, bei regos lauko ir rankiškumo sąveika nebuvo reikšminga, visi

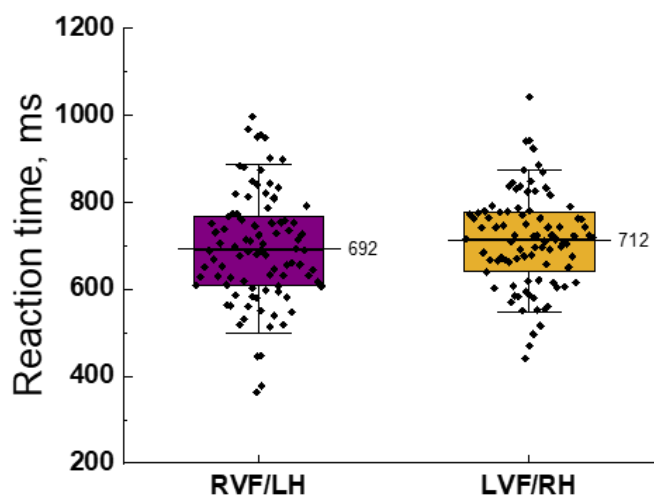
$F \leq 2,892$; $p \geq 0,093$; $\eta^2 \leq 0,032$. Šie rezultatai rodo, jog nepriklausomai nuo lyties, kairysis smegenų pusrutulis dominuoja TLDT užduotyje.



4.1. pav. Užduoties atlikimo tikslumas (ACC), kai žodinis stimulus buvo pateikiamas LVF ir RVF, * $p = 0,014$.

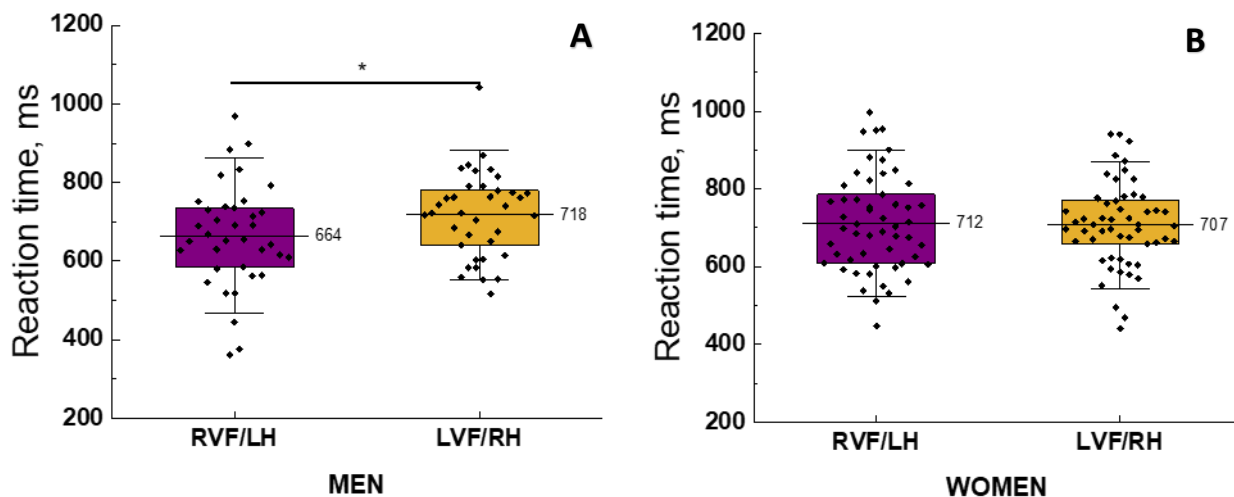
4.2.2. TLDT reakcijos laikas

Analizuojant reakcijos laiką bendroje dalyvių grupėje reikšmingo skirtumo tarp reakcijos laiko ir regos laukų nebuvo nustatyta $F(1, 88) = 1,01$; $p = 0,317$; $\eta^2 = 0,011$ (4.2. pav.). Lyties ir reakcijos laiko sąveika taip pat nebuvo reikšminga $F(1, 88) = 0,608$, $p = 0,438$; $\eta^2 = 0,007$.



4.2. pav. Reakcijos laiko vidurkis ir pasiskirstymas kiekviename regos lauke (RVF/LVF).

Tačiau tyrimo rezultatai parodė reikšmingą lyties ir regos lauko sąveiką, $F(1, 88) = 6,859$; $p = 0,010$; $\eta^2 = 0,072$. Post hoc t- testas parodė, jog vyrai reagavo į stimulą greičiau, kai žodžiai buvo pateikiami į dešinįjį regos lauką, nei į kairįjį ($t = 3,195$; $p = 0,003$), o moterų grupėje statistiškai reikšmingas ryšys tarp reakcijos laiko ir regos laukų nebuvo nustatytas ($t = -0,291$; $p = 0,772$) (4.3. pav.).



4.3. pav. Reakcijos laiko vidurkis, standartinis nuokrypis ir pasiskirstymas skirtinguose regos laukuose vyrų (A) ir moterų (B) grupėse, * $p = 0,003$.

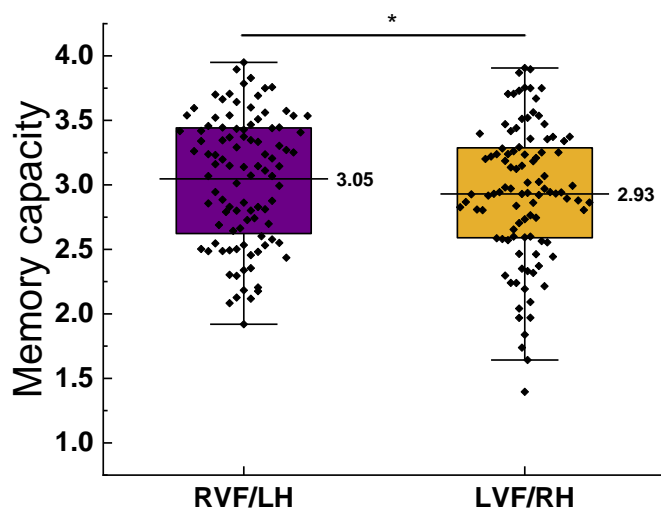
Tai rodo, kad vyrai stimulą apdoroja greičiau ir tiksliau, kuomet jis pateikiamas į dešinįjį regos lauką, kas gali reikšti didesnę vyrų smegenų pusrutulių lateralizaciją.

4.3. Vizualinės darbinės atminties užduoties rezultatai

Tyrimo buvo lyginta atminties talpos, užduoties atlikimo tikslumo ir reakcijos laiko priklausomybė nuo dešiniojo ir kairiojo regos lauko bei dalyvių lyties, taip pat užduoties tikslumo ir reakcijos laiko priklausomybė nuo pateiktų stimulų skaičiaus.

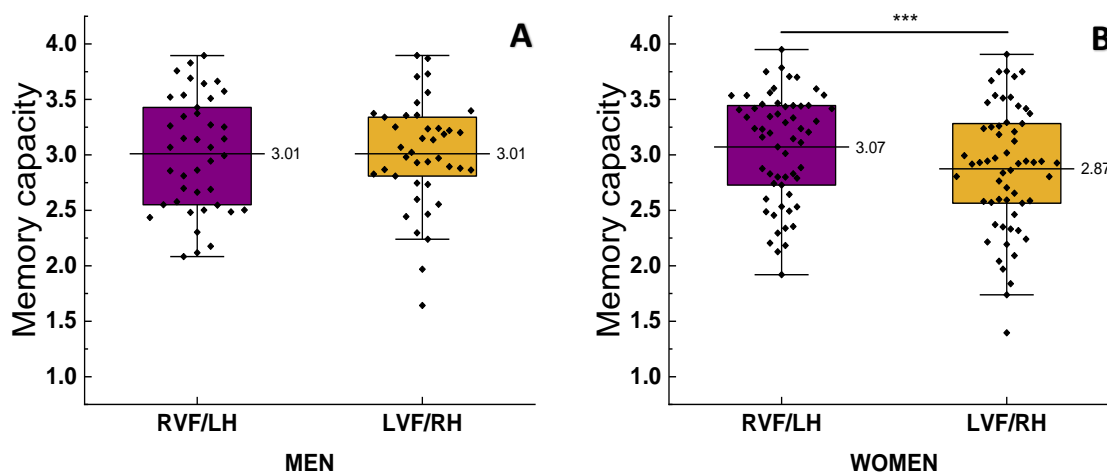
4.3.1. Atminties talpa

Iš VWM duomenų apskaičiavus atminties talpą, pagal anksčiau pateiktą formulę (žr. sk. 2.4.), gavome reikšmingą atminties talpos skirtumą tarp RVF/LH ir LVF/RH, $F(1, 96) = 6,047$; $p = 0,016$; $\eta^2 = 0,059$ (4.4. pav.). Šie rezultatai rodo, jog didesnė atminties talpa, t.y. tiriamieji geba daugiau ir geriau įsiminti informaciją, kuomet vizualinis stimulus yra pateikiamas dešiniajame regos lauke ir informaciją apdoroja kairysis smegenų pusrutulis. Lyties ir atminties talpos sąveika nebuvo reikšminga, $F(1, 96) = 0,254$; $p = 0,615$; $\eta^2 = 0,003$.



4.4. pav. Atminties talpa, kai stimulai buvo pateikiami skirtinguose regos laukuose, * $p = 0,016$.

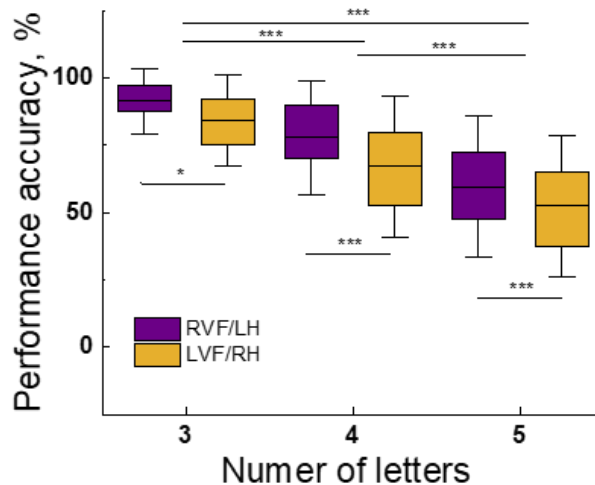
Vertinant lyties ir regos lauko sąveiką buvo pastebėta reikšminga priklausomybė, $F(1, 96) = 5,974$; $p = 0,016$; $\eta^2 = 0,059$. Atlikus post hoc t- testą paaiškėjo, jog moterų atminties talpa buvo didesnė, kai stimulus buvo pateikiamas į dešinįjį regos lauką, nei tuo atveju, kai stimulus pasirodydavo kairiajame regos lauke ($t = 3,964$; $p < 0,001$). Vyrų atminties talpa skirtinguose regos laukuose nesiskyrė ($t = -0,056$; $p = 0,956$) (4.5. pav.).



4.5. pav. Atminties talpos vidurkis, standartinis nuokrypis ir pasiskirstymas skirtinguose regos laukuose vyrų (A) ir moterų (B) grupėse, *** $p < 0,001$.

4.3.2. VWM užduoties atlikimo tikslumas

ANOVA analizė parodė reikšmingą RVF/LH pranašumą, $F(1, 96) = 41,65$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,303$. Tai reiškia, kad užduotis atliekama tiksliau, kai stimulą apdoroja kairysis smegenų pusrutulis (4.6. pav.).



4.6. pav. VWM užduoties atlikimo tikslumas ir standartinis nuokrypis trijose užduoties sąlygose, * $p < 0,001$; *** $p < 0,0001$.

Kaip ir tikėtasi, kuo daugiau raidžių buvo pateikta stimule, t.y. kuo didesnė atminties apkrova, tuo blogiau tiriamasis atliko užduotį ($F(2, 192) = 175,259$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 0,646$). Post hoc (Bonferroni) palyginimai parodė, kad užduoties tikslumas skiriasi tarp visų trijų sąlygų ($p < 0,0001$) (4.2. lentelė). Nagrinėjant lyties ir rankiškumo įtaką užduoties atlikimo tikslumo priklausomybei nuo regos laukų statistiškai reikšmingos įtakos nebuvo rasta, $F \leq 0,828$; $p \geq 0,439$; $\eta^2 \leq 0,09$. Taip pat, regos lauko ir raidžių kiekio stimule sąveika nebuvo reikšminga, $F = 0,791$; $p = 0,455$; $\eta^2 = 0,008$. Šie rezultatai rodo, kad nepriklausomai nuo lyties, rankiškumo ir raidžių kiekio stimule, kairysis pusrutulius dominuoja VWM užduotyje.

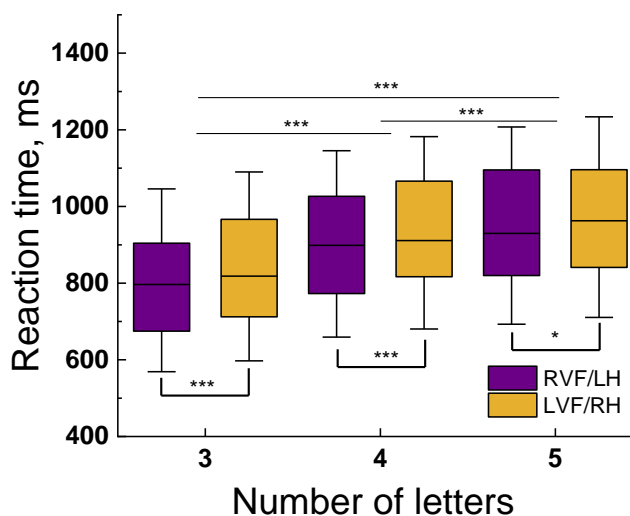
Lentelė 4.2. Užduoties atlikimo tikslumas skirtingomis užduoties sąlygomis.

	Raidžių skaičius					
	3		4		5	
	RVF/LH	LVF/RH	RVF/LH	LVF/RH	RVF/LH	LVF/RH
ACC	91.46 ± 8.06	84.13 ± 11.24	77.83 ± 14.20	67.17 ± 17.64	59.72 ± 17.47	52.45 ± 17.64

4.3.1. Reakcijos laikas VWM užduotyje

Statistiškai reikšmingas skirtumas buvo gautas įvertinus reakcijos laiką vizualinės darbinės atminties užduotyje tarp skirtingų stimulų bei regos laukų. Kaip ir buvo tikimasi, reakcijos laikas buvo tiesiogiai proporcingas nuo pateiktų raidžių kiekio: sprendimo priėmimui reikėjo mažiausiai laiko, kai stimulus susidėjo iš trijų raidžių, o daugiausiai – kai stimulo metu pasirodydavo 5 raidės ($F(1,333, 190,945) = 88,384$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,479$) (4.3. lentelė). Taip pat, statistiškai reikšmingi rezultatai buvo gauti palyginus skirtinguose regos laukuose pateiktų stimulų reakcijos laiką

($p < 0,0001$). Reakcijos laikas buvo trumpesnis, kai stimulus, kurį reikėjo įsiminti, buvo pateiktas dešiniajame regos lauke, dalyviai greičiau priimdavo sprendimą ir paspausdavo reikiamą mygtuką ($F(1, 96) = 15,098$; $p < 0,001$; $\eta^2 = 0,136$) (4.7. pav.).



4.7. pav. Reakcijos laiko priklausomybė nuo raidžių kiekio ir vizualinio lauko krypties, * $p < 0,05$; ** $p < 0,001$.

Analizė atkleidė regos lauko ir raidžių skaičiaus sąveikos tendenciją, $F(1,989, 190,945) = 2,556$; $p = 0,080$; $\eta^2 = 0,026$. Post hoc testas parodė, jog regos laukų skirtumas sumažėjo priklausomai nuo atminties apkrovos (3 raidės $t = -6,58$, $p < 0,01$; 4 raidės $t = -4,069$; $p < 0,001$; 5 raidės $t = -2,764$; $p = 0,007$). Lyties, sąveikos tarp lyties ir regos lauko, bei regos lauko ir rankškumo sąveika nebuvo reikšminga reakcijos laikui, visi $F \leq 1,247$; $p \geq 0,267$; $\eta^2 \leq 0,013$.

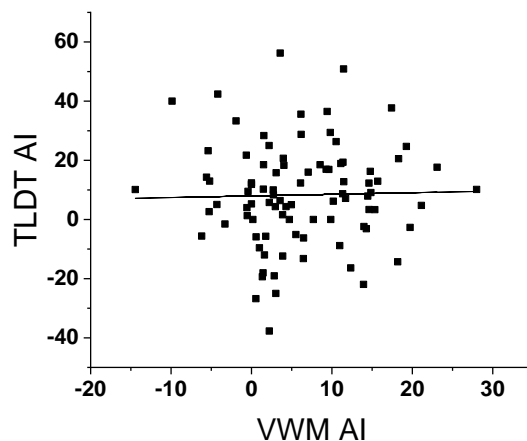
Lentelė 4.3. VWM užduoties reakcijos laikas skirtingose užduoties sąlygose.

	Raidžių skaičius					
	3		4		5	
	RVF/LH	LVF/RH	RVF/LH	LVF/RH	RVF/LH	LVF/RH
RT	807 ± 158 ms	843 ± 164 ms	902 ± 162 ms	931 ± 167 ms	950 ± 171 ms	972 ± 174 ms

4.4. Sąsajos tarp TLDT ir VWM užduočių atlikimo parametrų vertinimas

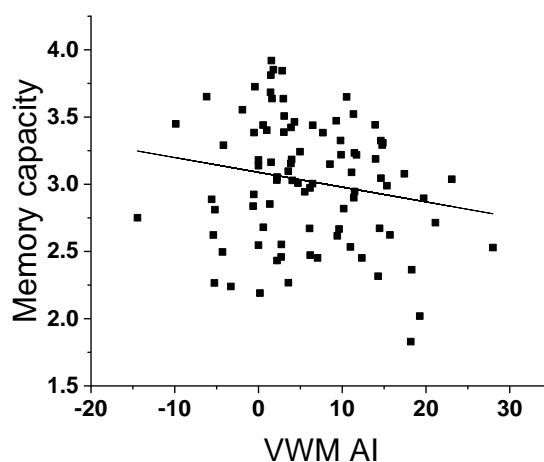
Analizuojant sąsajas tarp TLDT ir VWM užduočių atlikimo parametrų, atskirai apskaičiavome kiekvienos užduoties asimetrijos indeksus (žr. 3 sk.) ir įvertinome jų priklausomybę. Tačiau Pearson'o koreliacijos analizė neparodė priklausomybės tarp šių dviejų užduočių asimetrijos indeksų ($r = 0,025$; $p = 0,819$) (4.8. pav.). Papildomai, VWM užduotyje asimetrijos indeksas buvo apskaičiuotas atskirai kiekvienam stimulų kiekiui, siekiant įvertinti ar sunkesnės/lengvesnės sąlygos įtaką. Vis dėlto, jokios reikšmingos priklausomybės tarp TLDT

asimetrijos indekso ir VWM asimetrijos indeksų 3, 4 ir 5 raidžių sąlygose nebuvo nustatyta (visi $r < 0,18$; $p > 0,09$).



4.8. pav. TLDT ir VWM asimetrijos indeksų pasiskirstymas

Tiriant atminties talpos priklausomybę nuo vizualinės darbinės atminties asimetrijos indekso, stebima neigiamos koreliacijos tendencija tarp VWM AI ir atminties talpos ($r = -0,185$; $p = 0,082$). Atminties talpa buvo mažesnė, kuomet dalyviai buvo labiau lateralizuoti į kairįjį smegenų pusrutulį (4.9. pav.).



4.9. pav. VWM užduoties atlikimo tikslumo priklausomybė nuo atminties talpos.

5. REZULTATŲ APTARIMAS

Šiame tyrime buvo siekta išsiaiškinti užsienio (anglų) kalbos ir vizualinės darbinės atminties lateralizaciją bei sąsajas tarp šių kognityvinių funkcijų pasitelkiant pusės regos lauko paradigmą.

Translingvistinio leksikinio sprendimo užduotis buvo sukurta siekiant palengvinti pusrutulių dominavimo užsienio kalbos apdorojimo procesuose nustatymą, aplinkoje, kurioje

asmenys kalba keliomis skirtingomis kalbomis, ir taip supaprastinti tyrimų rezultatų palyginimą visose kalbinėse grupėse. TLDT užduotis buvo sukurta laikantis procedūrinių rekomendacijų ir pasirenkant trumpus, nuo 4 iki 6 raidžių (Howell & Bryden, 1987), tachistoskopiškai pateikiamus 100 ms žodinius ir nežodinius stimulus abiejuose regos laukuose (Hunter & Brysbaert, 2008). Mūsų gauti rezultatai translingvistinėje leksikinio sprendimo užduotyje dalinai sutampa su ankstesniais tyrimais, t.y. rodo kairiojo smegenų pusrutulio pranašumą prieš dešinįjį. Tiek J. Willemin (2016), tiek M. Hausmann (2019) analogiškuose tyrimuose buvo gautas reikšmingas dešiniojo regos lauko/ kairiojo smegenų pranašumas užduoties tikslume ir reakcijos laike, kas rodo kairiojo smegenų pusrutulio dominavimą apdorojant užsienio (anglų) kalbą.

Be to, buvo įvertinta lateralizaciją vyrų ir moterų grupėse. Reakcijos laiko skirtumas bendroje dalyvių grupėje tarp skirtingų regos laukų nesiskyrė, tačiau išskyrus vyrų ir moterų grupes, vyrai užduoties metu pateikdavo atsakymą greičiau, kuomet stimulus pasirodydavo dešiniajame regos lauke ($RT_{RVF} = 664$ ms; $RT_{LVF} = 718$ ms, skirtumas 54 ms) ir šis rezultatas sutampa su J. Willemin (2016) gautu rezultatu vyrų grupėje ($RT_{RVF} = 767$ ms; $RT_{LVF} = 832$ ms, skirtumas 65 ms). Šie rezultatai dalinai patvirtina hipotezę, jog vyrai yra labiau lateralizuoti nei moterys (Shaywitz et al., 1995; Voyer, 2011). Kita vertus, lyčių lateralizacijos skirtumai ne visada randami (Guadalupe et al., 2015) arba yra labai maži (Bless et al., 2015). Šie prieštaringi rezultatai dėl lyčių skirtumų gali kilti dėl skirtingų naudojamų metodikų (Mohr et al., 2005), bei dėl lytinių hormonų įtakos ignoravimo tyrimų metu (Hausmann & Bayer, 2010).

Remiantis populiaria nuomone apie rankiškumo įtaką lateralizacijai (Bless et al., 2015; Johnston et al., 2009), buvo galima tikėtis, jog dešiniarankiai bus labiau lateralizuoti nei kairiarankiai ar mišri grupė, tačiau priklausomybės tarp asimetrijos indeksų ir rankiškumo nebuvo rasta. Tiesa, rankiškumo skirtumai dažniausiai, taip pat, būna labai maži (Bless et al., 2015) arba jų iš viso nebūna. Gauti rezultatai dalinai atitinka Corballis (2008) rezultatus, kur jis teigia, jog skirtumų tarp dešiniarankių ir kairiarankių nėra, bet yra reikšmingas skirtumas tarp pirmenybinės rankos preferencijos stiprumo, t.y. mišrios grupės dalyviai gauna žemesnius kognityvinių užduočių įverčius palyginus su kairiarankiais iš dešiniarankiai dalyviais. Tiksliesniems rankiškumo ir pusrutulio dominavimo kalbos užduotyse ryšiams nustatyti reikėtų pasitelkti neurovaizdinimo metodus, bei detaliau skirstyti rankiškumą.

Šiame tyrime gauti rezultatai bent dalinai atkartoją rezultatus pristatytus vertinant tiek gimtosios (Gerrits et al., 2020; Hunter & Brysbaert, 2008), tiek negimtosios (Hausmann et al., 2019; Willemin et al., 2016) kalbos lateralizaciją. Tai leidžia manyti, jog pusės regos lauko paradigma, kuri remiasi prielaida, jog užduoties tikslumas bus geresnis ir reakcijos laikas bus trumpesnis, kai stimulus yra pateikiamas į dominuojantį pusrutulį, gali būti patikimas metodas užsienio (anglų) kalbos lateralizacijos tyrimams lietuvių populiacijoje.

Vizualinės darbinės atminties lateralizacijos tyrime buvo pritaikyta pusės regos lauko paradigma. Tyrimo rezultatai parodė dešiniojo regos lauko/ kairiojo smegenų pusrutulio pranašumą apdorojant vizualinius stimulus, sudarytus iš 3 – 5 raidžių kombinacijų. ankstesniuose tyrimuose, pasitelkiant fMRT, buvo nustatyta, jog verbalinės darbinės atminties užduoties metu yra aktyvuojamos sritys kairiajame smegenų pusrutulyje, o tuo tarpu vizualinės darbinės atminties užduoties metu – dešinysis smegenų pusrutulis (Nagel et al., 2013). Šie mūsų gauti rezultatai gali reikšti, jog tiriamieji, užduoties metu turėdami pasakyti, ar nurodytame regos lauke pasikeitė viena raidė ar nepasikeitė, įtraukė verbalines kodavimo strategijas, taip įsimindami ne raidžių padėtis/formas, bet raides, kurios buvo pateiktos nurodytame regos lauke.

Tyrimo buvo analizuota kaip VWM užduoties tikslumas ir reakcijos laikas priklauso nuo atminties apkrovos, t.y. kiek raidžių buvo pateikta stimule. Kaip ir galima buvo tikėtis remiantis ankstesniais tyrimais (K. M. Miller et al., 2009; Schmidt et al., 2009), didėjant atminties apkrovai prastėjo užduoties atlikimo tikslumas ir reakcijos laikas. Taip pat, sunkėjant užduočiai nežymiai mažėjo kairiojo smegenų pusrutulio pranašumas prieš dešinįjį, kas, galbūt, atspindi, jog pasiekus maksimalią atminties talpą, kognityvinės funkcijos tampa mažiau lateralizuotos ir į informacijos apdorojimo procesus yra įtraukiami abu smegenų pusrutuliai.

Norėdami įvertinti ar smegenų pusrutulio dominavimas atliekant užsienio kalbos užduotį ir vizualinės darbinės atminties užduotį yra susiję, įvertinome ryšį tarp šių dviejų užduočių asimetrijos indeksų. Tačiau reikšminga priklausomybė ar tendencija nepastebėta. Tuo remiantis, galima daryti išvadą, jog šių dviejų užduočių atlikimo metu skirtingi ir nepriklausomi mechanizmai buvo atsakingi už smegenų pusrutulių aktyvavimą/ dominavimą. Nors yra tyrimų pristatančių neuroanatominius įrodymus, kurie atskleidžia ryšį tarp sintaksinių procesų ir darbinės atminties, tačiau dinaminis ryšys dar nėra nustatytas (Makuuchi & Friederici, 2013).

Vertinant atminties talpos priklausomybę nuo VWM asimetrijos indekso buvo pastebėta, įdomi tendencija – kuo didesnis teigiamas asimetrijos indeksas, nurodantis stipresnę lateralizaciją į kairiąją pusę, tuo mažesnė atminties talpa. Tai reiškia, kad kuo mažiau lateralizuotos žmonių smegenys, tuo jų atminties talpa didesnė. Ši mūsų gauta priklausomybė iš dalies siejasi su B. Rympa (1999) rezultatais, kurie rodo, jog maža atminties apkrova (3 objektai) aktyvuoja kairįjį smegenų pusrutulį, o didesnė atminties apkrova (6 raidės) – plačią bilateralinę priekinę ir parietalinę sritį.

4.1. Tyrimo apribojimai

TLDT užduočiai buvo atrinkti 4 – 6 raidžių ilgio žodžiai egzistuojantys anglų, italų, prancūzų ir vokiečių kalbose, patikrintas šių žodžių dažnumas anglų – prancūzų kalbose ir eksperimentui parinkti dažniausiai vartojami žodžiai šiose abėjose kalbose. Galbūt specifiškai atrinkus/pritaikius žodžius pagal jų naudojimo dažnį anglų – lietuvių kalbose, užduoties rezultatai

būtų geresni ir skirtumai tarp skirtingų sąlygų būtų didesni. Nors po TLDT užduoties mūsų tyrimo dalyviai pažymėjo žinantys didžiąją dalį žodžių, tačiau keli žodžiai (pvz.: gala, agenda) išsiskyrė jų nežinojimu. O siekiant įvertinti dalyvių anglų kalbos mokėjimą objektyviau būtų vertinti ne savęs vertinimo klausimynų, o kalbos lygio nustatymo testu.

Taip pat, prie tyrimo trūkumų abejojose užduotyse galima būtų priskirti nevienodą vaikinų/merginų ir kairiarankių/ dešiniarankių pasiskirstymą imtyje. Dar tikslesniems rezultatams reikėtų atsižvelgti į tiriamųjų merginų menstruacinio ciklo dieną ir hormoninę pusiausvyrą.

5. IŠVADOS

1. TLDT užduoties atlikimo tikslumas buvo didesnis, kai žodžiai buvo pateikiami dešiniajame regos lauke ir juos apdorojo kairysis smegenų pusrutulis, nepriklausimai nuo tiriamųjų lyties.
2. TLDT užduoties reakcijos laikas bendroje imtyje nesiskyrė, tačiau vyrų grupėje buvo reikšmingai mažesnis, kai pateiktą žodį apdorojo kairysis smegenų pusrutulis.
3. Regimosios darbinės atminties užduotyje atlikimas buvo greitesnis ir tikslesnis, kai stimulus buvo pateikiamas dešiniajame regos lauke ir jį apdorojo kairysis smegenų pusrutulis, nepriklausomai nuo lyties.
4. Tiesioginis ryšys tarp regimosios darbinės atminties ir translingvistinės leksikinio sprendimo užduočių lateralizacijos indeksų nenustatytas.

VILNIAUS UNIVERSITETAS

Gyvybės mokslų centras

Neurobiologijos ir biofizikos katedra

Indrė PRETKELYTĖ

Magistro baigiamasis darbas

Užsienio kalbos apdorojimo ir darbinės atminties funkcinė lateralizacija smegenyse

SANTRAUKA

Įvairių kognityvinių funkcijų smegenų lateralizacija plačiai tiriamas fenomenas dėl jo galimo ryšio su kognityviniais gebėjimais, efektyvumu ir dinamika. Specifinių funkcijų lateralizacijai nustatyti yra naudojami įvairūs neurovaizdinimo metodai, kurie, dažniausiai, yra brangūs ir/ arba reikalauja daug laiko. Vienas iš alternatyvių, paprastų ir pigių metodų, kuris galėtų būti naudojamas didelėse žmonių imtyse, siekiant įvertinti smegenų pusrutulių funkcinį laterališkumą yra pusės regos lauko paradigma. Tad šio tyrimo tikslas – pasitelkiant pusės regos lauko paradigmą iširti užsienio kalbos ir regimosios darbinės atminties laterališkumą bei sąsajas tarp šių kognityviųjų funkcijų lateralizacijos.

Tyrime buvo analizuoti 92 dalyvių, kurie atliko translingvistinio leksikinio sprendimo užduotį užsienio (anglų) kalbos lateralizacijos nustatymui duomenys ir 99 dalyvių, atlikusių vizualinės darbinės atminties užduotį, duomenys. Buvo skaičiuota užduočių atlikimo tikslumo ir reakcijos laiko priklausomybė nuo regos lauko, lyties įtaka lateralizacijai ir kaip šios dvi kognityvinės funkcijos susijusios tarpusavyje.

Tyrimo rezultatai atskleidė, kad: TLDT užduoties atlikimo tikslumas buvo didesnis, kai žodžiai buvo pateikiami dešiniajame regos lauke ir juos apdorojo kairysis smegenų pusrutulis, nepriklausimai nuo tiriamųjų lyties; TLDT užduoties reakcijos laikas bendroje imtyje nesiskyrė, tačiau vyrų grupėje buvo reikšmingai mažesnis, kai pateiktą žodį apdorojo kairysis smegenų pusrutulis; Regimosios darbinės atminties užduotyje atlikimas buvo greitesnis ir tikslesnis, kai stimulus buvo pateikiamas dešiniajame regos lauke ir jį apdorojo kairysis smegenų pusrutulis, nepriklausomai nuo lyties; Tiesioginis ryšys tarp regimosios darbinės atminties ir translingvistinės leksikinio sprendimo užduočių lateralizacijos indeksų nenustatytas.

VILNIUS UNIVERSITY

LIFE SCIENCE CENTER

Department of Neurobiology and Biophysics

Indrė PRETKELYTĖ

Master thesis

Functional Lateralization of Foreign Language and Visual Working Memory Processing

SUMMARY

Brain lateralization of various cognitive functions is a widely studied phenomenon due to its possible relationship with cognitive abilities, efficiency, and dynamics. Neuroscientists have used neuroimaging techniques to localize specific cognitive functions. But these methods are costly, time consuming and not available for all researchers. Visual half – field paradigm is one of the alternative methods which is simple, inexpensive and could be used in large samples to determine the dominant hemisphere of specific function. The aim of this study was to investigate lateralization of foreign language and visual working memory and the connections between the lateralization of these cognitive functions using the visual half – field paradigm.

In the study 92 participants who performed the translingual lexical decision task were analyzed for lateralization of foreign (English) language, 99 participants – for lateralization of visual working memory. We analyzed how accuracy and response time depends on visual field, how gender is related to hemispheric lateralization and what is the relationship between visual working memory and translingual lexical decision task.

The result of study revealed: the accuracy of the TLDT was higher when words were presented in the right visual field and processed by the left hemisphere, this result is independent of the gender; the response time of the TLDT did not differ in the overall sample, but was significantly faster in the male group when the given word was processed by the left hemisphere; the performance in the visual working memory task was faster and more accurate when the stimulus was presented in the right visual field and processed by the left hemisphere, regardless of gender; A direct relationship between visual working memory and translingual lexical decision task lateralization indexes has not been established.

Literatūros sąrašas

1. Amunts, K., Lenzen, M., Friederici, A. D., Schleicher, A., Morosan, P., Palomero-Gallagher, N., & Zilles, K. (2010). Broca's region: Novel organizational principles and multiple receptor mapping. *PLoS Biology*, 8(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1000489>
2. Andersen, R. A., & Cui, H. (2009). Intention, action planning, and decision making in parietal-frontal circuits. *Neuron*, 63(5), 568–583. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2009.08.028>
3. Baron-Cohen, S., Knickmeyer, R. C., & Belmonte, M. K. (2005). Sex differences in the brain: Implications for explaining autism. *Science (New York, N.Y.)*, 310(5749), 819–823. <https://doi.org/10.1126/science.1115455>
4. Bishop, D. V. M. (2013). Cerebral asymmetry and language development: Cause, correlate or consequence? *Science (New York, N.Y.)*, 340(6138), 1230531. <https://doi.org/10.1126/science.1230531>
5. Bless, J. J., Westerhausen, R., Torkildsen, J. von K., Gudmundsen, M., Kompus, K., & Hugdahl, K. (2015). Laterality across languages: Results from a global dichotic listening study using a smartphone application. *Laterality*, 20(4), 434–452. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2014.997245>
6. Boles, D. B. (1994). An Experimental Comparison of Stimulus Type, Display Type, and Input Variable Contributions to Visual Field Asymmetry. *Brain and Cognition*, 24(2), 184–197. <https://doi.org/10.1006/brcg.1994.1010>
7. Boles, David B. (1990). What bilateral displays do. *Brain and Cognition*, 12(2), 205–228. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(90\)90016-H](https://doi.org/10.1016/0278-2626(90)90016-H)
8. Boles, David B., & Barth, J. M. (2011). “Does degree of asymmetry relate to performance?” A critical review. *Brain and Cognition*, 76(1), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.01.013>
9. Bourne, V. (2006). The divided visual field paradigm: Methodological considerations. *Laterality*, 11, 373–393. <https://doi.org/10.1080/13576500600633982>
10. Broca, P. (1865). Sur le siège de la faculté du langage articulé. *Bulletins de la Société d'anthropologie de Paris*, 6(1), 377–393. <https://doi.org/10.3406/bmsap.1865.9495>
11. Brown, J. W., & Jaffe, J. (1975). Hypothesis on cerebral dominance. *Neuropsychologia*, 13(1), 107–110. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(75\)90054-8](https://doi.org/10.1016/0028-3932(75)90054-8)
12. Cabeza, R. (2002). Hemispheric asymmetry reduction in older adults: The HAROLD model. *Psychology and Aging*, 17(1), 85–100. <https://doi.org/10.1037//0882-7974.17.1.85>
13. Camina, E., & Güell, F. (2017). The Neuroanatomical, Neurophysiological and Psychological Basis of Memory: Current Models and Their Origins. *Frontiers in Pharmacology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fphar.2017.00438>

14. Cao, F., Tao, R., Liu, L., Perfetti, C. A., & Booth, J. R. (2013). High proficiency in a second language is characterized by greater involvement of the first language network: Evidence from Chinese learners of English. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *25*(10), 1649–1663.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_00414
15. Chatterjee, A., & Coslett, H. B. (2013). *The Roots of Cognitive Neuroscience: Behavioral Neurology and Neuropsychology*. OUP USA.
16. Chein, J. M., Moore, A. B., & Conway, A. R. A. (2011). Domain-general mechanisms of complex working memory span. *NeuroImage*, *54*(1), 550–559.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.07.067>
17. *Classics in the History of Psychology—Broca (1861a, Français)*. (n.d.). Retrieved May 18, 2021, from <https://psychclassics.yorku.ca/Broca/perte.htm>
18. Coltheart, M. (1980). Iconic memory and visible persistence. *Perception & Psychophysics*, *27*(3), 183–228. <https://doi.org/10.3758/BF03204258>
19. Corballis, M. C. (1991). *The lopsided ape: Evolution of the generative mind* (pp. vii, 366). Oxford University Press.
20. Corballis, M. C., Hattie, J., & Fletcher, R. (2008). Handedness and intellectual achievement: An even-handed look. *Neuropsychologia*, *46*(1), 374–378.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.09.009>
21. Cowan, N. (2001). The magical number 4 in short-term memory: A reconsideration of mental storage capacity. *Behavioral and Brain Sciences*, *24*(1), 87–114.
<https://doi.org/10.1017/S0140525X01003922>
22. Cowan, N. (2008). Chapter 20 What are the differences between long-term, short-term, and working memory? In W. S. Sossin, J.-C. Lacaille, V. F. Castellucci, & S. Belleville (Eds.), *Progress in Brain Research* (Vol. 169, pp. 323–338). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-6123\(07\)00020-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6123(07)00020-9)
23. Cowan, N., Li, Y., Glass, B., & Saults, J. S. (2018). Development of the Ability to Combine Visual and Acoustic Information in Working Memory. *Developmental Science*, *21*(5), e12635.
<https://doi.org/10.1111/desc.12635>
24. Crow, T. J., Crow, L. R., Done, D. J., & Leask, S. (1998). Relative hand skill predicts academic ability: Global deficits at the point of hemispheric indecision. *Neuropsychologia*, *36*(12), 1275–1282. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(98\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(98)00039-6)
25. DeLacoste-Utamsing, C., & Holloway, R. L. (1982). Sexual dimorphism in the human corpus callosum. *Science (New York, N.Y.)*, *216*(4553), 1431–1432.
<https://doi.org/10.1126/science.7089533>

26. Deppe, M., Ringelstein, E. B., & Knecht, S. (2004). The investigation of functional brain lateralization by transcranial Doppler sonography. *NeuroImage*, *21*(3), 1124–1146. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.10.016>
27. Dickerson, B. C., & Eichenbaum, H. (2010). The episodic memory system: Neurocircuitry and disorders. *Neuropsychopharmacology: Official Publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, *35*(1), 86–104. <https://doi.org/10.1038/npp.2009.126>
28. Dixit, N. K., Gerton, B. K., Kohn, P., Meyer-Lindenberg, A., & Berman, K. F. (2000). Age-related changes in rCBF activation during an N-back working memory paradigm occur prior to age 50. *NeuroImage*, *11*(5, Supplement), S94. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(00\)91027-9](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(00)91027-9)
29. Dubb, A., Gur, R., Avants, B., & Gee, J. (2003). Characterization of sexual dimorphism in the human corpus callosum. *NeuroImage*, *20*(1), 512–519. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(03\)00313-6](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(03)00313-6)
30. Fairweather, H. (1976). Sex differences in cognition. *Cognition*, *4*(3), 231–280. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(76\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(76)90019-6)
31. Felton, A., Vazquez, D., Ramos-Nunez, A. I., Greene, M. R., McDowell, A., Hernandez, A. E., & Chiarello, C. (2017). Bilingualism Influences Structural Indices of Interhemispheric Organization. *Journal of Neurolinguistics*, *42*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2016.10.004>
32. Friederici, A. D. (2011). The Brain Basis of Language Processing: From Structure to Function. *Physiological Reviews*, *91*(4), 1357–1392. <https://doi.org/10.1152/physrev.00006.2011>
33. Friederici, A. D., Fiebach, C. J., Schlesewsky, M., Bornkessel, I. D., & von Cramon, D. Y. (2006). Processing linguistic complexity and grammaticality in the left frontal cortex. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *16*(12), 1709–1717. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhj106>
34. Gao, Y., Sun, Y., Lu, C., Ding, G., Guo, T., Malins, J. G., Booth, J. R., Peng, D., & Liu, L. (2017). Dynamic spatial organization of the occipito-temporal word form area for second language processing. *Neuropsychologia*, *103*, 20–28. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.06.007>
35. Gazzaniga, M. S., Bogen, J. E., & Sperry, R. W. (1965). OBSERVATIONS ON VISUAL PERCEPTION AFTER DISCONNEXION OF THE CEREBRAL HEMISPHERES IN MAN. *Brain*, *88*(2), 221–236. <https://doi.org/10.1093/brain/88.2.221>
36. Gerrits, R., Clercq, P. D., Verhelst, H., & Vingerhoets, G. (2020). Evaluating the performance of the visual half field paradigm as a screening tool to detect right hemispheric language dominance. *Laterality*, *25*(6), 722–739. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2020.1854279>
37. Geschwind, N. (1972). Language and the brain. *Scientific American*, *226*(4), 76–83. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0472-76>

38. Gotts, S. J., Jo, H. J., Wallace, G. L., Saad, Z. S., Cox, R. W., & Martin, A. (2013). Two distinct forms of functional lateralization in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *110*(36), E3435–E3444. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302581110>
39. Grabowska, A. (2017). Sex on the brain: Are gender-dependent structural and functional differences associated with behavior? *Journal of Neuroscience Research*, *95*(1–2), 200–212. <https://doi.org/10.1002/jnr.23953>
40. Guadalupe, T., Zwiers, M. P., Wittfeld, K., Teumer, A., Vasquez, A. A., Hoogman, M., Hagoort, P., Fernandez, G., Buitelaar, J., van Bokhoven, H., Hegenscheid, K., Völzke, H., Franke, B., Fisher, S. E., Grabe, H. J., & Francks, C. (2015). Asymmetry within and around the human planum temporale is sexually dimorphic and influenced by genes involved in steroid hormone receptor activity. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *62*, 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2014.07.015>
41. Gupta, E., Khan, A., Cs, R., Babu, R., Lalwani, R., & Aneja, S. (2011). Sexual dimorphism of splenial thickness of corpus callosum. *Current Neurobiology*, *2*.
42. Harshman, R. A., Hampson, E., & Berenbaum, S. A. (1983). Individual differences in cognitive abilities and brain organization, Part I: Sex and handedness differences in ability. *Canadian Journal of Psychology*, *37*(1), 144–192. <https://doi.org/10.1037/h0080690>
43. Hausmann, M., & Güntürkün, O. (2000). Steroid fluctuations modify functional cerebral asymmetries: The hypothesis of progesterone-mediated interhemispheric decoupling. *Neuropsychologia*, *38*(10), 1362–1374. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(00\)00045-2](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(00)00045-2)
44. Hausmann, Markus. (2017). Why sex hormones matter for neuroscience: A very short review on sex, sex hormones, and functional brain asymmetries. *Journal of Neuroscience Research*, *95*(1–2), 40–49. <https://doi.org/10.1002/jnr.23857>
45. Hausmann, Markus, & Bayer, U. (2010). Sex Hormonal Effects on Hemispheric Asymmetry and Interhemispheric Interaction. In *The two halves of the brain: Information processing in the cerebral hemispheres* (pp. 253–286). <https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262014137.003.0176>
46. Hausmann, Markus, Brysbaert, M., van der Haegen, L., Lewald, J., Specht, K., Hirnstein, M., Willemin, J., Barton, J., Buchilly, D., Chmetz, F., Roch, M., Brederoo, S., Dael, N., & Mohr, C. (2019). Language lateralisation measured across linguistic and national boundaries. *Cortex*, *111*, 134–147. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.10.020>
47. Hickok, G., & Poeppel, D. (2007). The cortical organization of speech processing. *Nature Reviews. Neuroscience*, *8*(5), 393–402. <https://doi.org/10.1038/nrn2113>
48. Hines, M., Chiu, L., McAdams, L. A., Bentler, P. M., & Lipcamon, J. (1992). Cognition and the corpus callosum: Verbal fluency, visuospatial ability, and language lateralization related to

- midsagittal surface areas of callosal subregions. *Behavioral Neuroscience*, *106*(1), 3–14.
<https://doi.org/10.1037//0735-7044.106.1.3>
49. Hirnstein, M., Hugdahl, K., & Hausmann, M. (2019). Cognitive sex differences and hemispheric asymmetry: A critical review of 40 years of research. *Laterality*, *24*(2), 204–252.
<https://doi.org/10.1080/1357650X.2018.1497044>
50. Howell, J. R., & Bryden, M. P. (1987). The effects of word orientation and imageability on visual half-field presentations with a lexical decision task. *Neuropsychologia*, *25*(3), 527–538.
[https://doi.org/10.1016/0028-3932\(87\)90077-7](https://doi.org/10.1016/0028-3932(87)90077-7)
51. Hugdahl, K. (2000). Lateralization of cognitive processes in the brain. *Acta Psychologica*, *105*(2), 211–235. [https://doi.org/10.1016/S0001-6918\(00\)00062-7](https://doi.org/10.1016/S0001-6918(00)00062-7)
52. Hunter, Z. R., & Brysbaert, M. (2008). Visual half-field experiments are a good measure of cerebral language dominance if used properly: Evidence from fMRI. *Neuropsychologia*, *46*(1), 316–325. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.007>
53. Indefrey, P., Brown, C. M., Hellwig, F., Amunts, K., Herzog, H., Seitz, R. J., & Hagoort, P. (2001). A neural correlate of syntactic encoding during speech production. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *98*(10), 5933–5936.
<https://doi.org/10.1073/pnas.101118098>
54. J. Levy. (1972). *Lateral specialization of the human brain: Behavioral manifestations and possible evolutionary basis*.
55. Jimura, K., Chushak, M. S., Westbrook, A., & Braver, T. S. (2018). Intertemporal Decision-Making Involves Prefrontal Control Mechanisms Associated with Working Memory. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991)*, *28*(4), 1105–1116. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx015>
56. Johnson, J. S., & Newport, E. L. (1989). Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cognitive Psychology*, *21*(1), 60–99. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(89\)90003-0](https://doi.org/10.1016/0010-0285(89)90003-0)
57. Johnston, D. W., Nicholls, M. E. R., Shah, M., & Shields, M. A. (2009). Nature’s experiment? Handedness and early childhood development. *Demography*, *46*(2), 281–301.
<https://doi.org/10.1353/dem.0.0053>
58. Kennedy, T. J. (2006). Language Learning and Its Impact on the Brain: Connecting Language Learning with the Mind Through Content-Based Instruction. *Foreign Language Annals*, *39*(3), 471–486. <https://doi.org/10.1111/j.1944-9720.2006.tb02900.x>
59. Kim, C., Kroger, J. K., Calhoun, V. D., & Clark, V. P. (2015). The role of the frontopolar cortex in manipulation of integrated information in working memory. *Neuroscience Letters*, *595*, 25–29. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2015.03.044>
60. Kimura, D. (1999). *Sex and Cognition*. MIT Press.

61. Krach, S., Chen, L. M., & Hartje, W. (2006). Comparison between visual half-field performance and cerebral blood flow changes as indicators of language dominance. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 11(2), 122–140. <https://doi.org/10.1080/13576500500384975>
62. Lanczik, M., & Keil, G. (1991). Carl Wernicke's localization theory and its significance for the development of scientific psychiatry. *History of Psychiatry*, 2(6), 171–180. <https://doi.org/10.1177/0957154X9100200604>
63. Lenroot, R. K., & Giedd, J. N. (2006). Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 30(6), 718–729. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2006.06.001>
64. Levine, S. C., Banich, M. T., & Koch-Weser, M. P. (1988). Face recognition: A general or specific right hemisphere capacity? *Brain and Cognition*, 8(3), 303–325. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(88\)90057-7](https://doi.org/10.1016/0278-2626(88)90057-7)
65. Levy, J. (1969). Possible basis for the evolution of lateral specialization of the human brain. *Nature*, 224(5219), 614–615. <https://doi.org/10.1038/224614a0>
66. Li, P., Zhang, F., Yu, A., & Zhao, X. (2019). Language History Questionnaire (LHQ3): An enhanced tool for assessing multilingual experience. *Bilingualism: Language and Cognition*, 1–7. <https://doi.org/10.1017/S1366728918001153>
67. Locke, J. L., & Bogin, B. (2006). Language and life history: A new perspective on the development and evolution of human language. *The Behavioral and Brain Sciences*, 29(3), 259–280; discussion 280-325. <https://doi.org/10.1017/s0140525x0600906x>
68. Luck, S. J., & Vogel, E. K. (2013). Visual working memory capacity: From psychophysics and neurobiology to individual differences. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(8), 391–400. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.06.006>
69. Luders, E., Toga, A. W., & Thompson, P. M. (2014). Why size matters: Differences in brain volume account for apparent sex differences in callosal anatomy: the sexual dimorphism of the corpus callosum. *NeuroImage*, 84, 820–824. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.09.040>
70. Mabbott, D. J., Noseworthy, M., Bouffet, E., Laughlin, S., & Rockel, C. (2006). White matter growth as a mechanism of cognitive development in children. *NeuroImage*, 33(3), 936–946. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.07.024>
71. Makuuchi, M., & Friederici, A. D. (2013). Hierarchical functional connectivity between the core language system and the working memory system. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 49(9), 2416–2423. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.01.007>
72. McCauley, R. J. (2013). *Assessment of Language Disorders in Children*. Psychology Press.
73. Mechelli, A., Crinion, J. T., Noppeney, U., O'Doherty, J., Ashburner, J., Frackowiak, R. S., & Price, C. J. (2004). Structural plasticity in the bilingual brain: Proficiency in a second language

and age at acquisition affect grey-matter density. *Nature*, 431(7010), 757–757.

<https://doi.org/10.1038/431757a>

74. Mellet, E., Jobard, G., Zago, L., Crivello, F., Petit, L., Joliot, M., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2014). Relationships between hand laterality and verbal and spatial skills in 436 healthy adults balanced for handedness. *Laterality*, 19(4), 383–404.
<https://doi.org/10.1080/1357650X.2013.796965>
75. Miller, E. K., & Cohen, J. D. (2001). An integrative theory of prefrontal cortex function. *Annual Review of Neuroscience*, 24, 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
76. Miller, K. M., Price, C. C., Okun, M. S., Montijo, H., & Bowers, D. (2009). Is the N-Back Task a Valid Neuropsychological Measure for Assessing Working Memory? *Archives of Clinical Neuropsychology*, 24(7), 711–717. <https://doi.org/10.1093/arclin/acp063>
77. Mohr, C., Michel, C. M., Lantz, G., Ortigue, S., Viaud-Delmon, I., & Landis, T. (2005). Brain State-dependent Functional Hemispheric Specialization in Men but not in Women. *Cerebral Cortex*, 15(9), 1451–1458. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi025>
78. Moore, A. B., Li, Z., Tyner, C. E., Hu, X., & Crosson, B. (2013). Bilateral basal ganglia activity in verbal working memory. *Brain and Language*, 125(3), 316–323.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.05.003>
79. Murty, V. P., Sambataro, F., Radulescu, E., Altamura, M., Iudicello, J., Zolnick, B., Weinberger, D. R., Goldberg, T. E., & Mattay, V. S. (2011). Selective updating of working memory content modulates meso-cortico-striatal activity. *NeuroImage*, 57(3), 1264–1272.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.05.006>
80. Nagel, B. J., Herting, M. M., Maxwell, E. C., Bruno, R., & Fair, D. (2013). Hemispheric lateralization of verbal and spatial working memory during adolescence. *Brain and Cognition*, 82(1), 58–68. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.02.007>
81. Narr, K., Thompson, P., Sharma, T., Moussai, J., Zoumalan, C., Rayman, J., & Toga, A. (2001). Three-dimensional mapping of gyral shape and cortical surface asymmetries in schizophrenia: Gender effects. *The American Journal of Psychiatry*, 158(2), 244–255.
<https://doi.org/10.1176/appi.ajp.158.2.244>
82. Newman, S. D., Ikuta, T., & Burns, T. (2010). The effect of semantic relatedness on syntactic analysis: An fMRI study. *Brain and Language*, 113(2), 51–58.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2010.02.001>
83. Oakes, L. M., Ross-Sheehy, S., & Luck, S. J. (2006). Rapid development of feature binding in visual short-term memory. *Psychological Science*, 17(9), 781–787.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01782.x>

84. Oldfield, R. C. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9(1), 97–113. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(71\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0028-3932(71)90067-4)
85. Osaka, M., Osaka, N., Kondo, H., Morishita, M., Fukuyama, H., Aso, T., & Shibasaki, H. (2003). The neural basis of individual differences in working memory capacity: An fMRI study. *NeuroImage*, 18(3), 789–797. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(02\)00032-0](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(02)00032-0)
86. Owen, A. M., McMillan, K. M., Laird, A. R., & Bullmore, E. (2005). N-back working memory paradigm: A meta-analysis of normative functional neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, 25(1), 46–59. <https://doi.org/10.1002/hbm.20131>
87. Pelletier, I., Sauerwein, H. C., Lepore, F., Saint-Amour, D., & Lassonde, M. (2007). Non-invasive alternatives to the Wada test in the presurgical evaluation of language and memory functions in epilepsy patients. *Epileptic Disorders: International Epilepsy Journal with Videotape*, 9(2), 111–126. <https://doi.org/10.1684/epd.2007.0109>
88. Peters, M., Reimers, S., & Manning, J. T. (2006). Hand preference for writing and associations with selected demographic and behavioral variables in 255,100 subjects: The BBC internet study. *Brain and Cognition*, 62(2), 177–189. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2006.04.005>
89. Pletzer, B. (2014). Sex-specific strategy use and global-local processing: A perspective toward integrating sex differences in cognition. *Frontiers in Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00425>
90. Pujol, J., Deus, J., Losilla, J. M., & Capdevila, A. (1999). Cerebral lateralization of language in normal left-handed people studied by functional MRI. *Neurology*, 52(5), 1038. <https://doi.org/10.1212/WNL.52.5.1038>
91. Rajsic, J., Burton, J. A., & Woodman, G. F. (2019). Contralateral delay activity tracks the storage of visually presented letters and words. *Psychophysiology*, 56(1), e13282. <https://doi.org/10.1111/psyp.13282>
92. Raznahan, A., Shaw, P., Lalonde, F., Stockman, M., Wallace, G. L., Greenstein, D., Clasen, L., Gogtay, N., & Giedd, J. N. (2011). How Does Your Cortex Grow? *Journal of Neuroscience*, 31(19), 7174–7177. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0054-11.2011>
93. Reuter-Lorenz, P. A., Jonides, J., Smith, E. E., Hartley, A., Miller, A., Marshuetz, C., & Koeppe, R. A. (2000). Age differences in the frontal lateralization of verbal and spatial working memory revealed by PET. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(1), 174–187. <https://doi.org/10.1162/089892900561814>
94. Riggs, K. J., Simpson, A., & Potts, T. (2011). The development of visual short-term memory for multifeature items during middle childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(4), 802–809. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.11.006>

95. Rogalsky, C., Matchin, W., & Hickok, G. (2008). Broca's area, sentence comprehension, and working memory: An fMRI Study. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2, 14.
<https://doi.org/10.3389/neuro.09.014.2008>
96. Rogers, L. J. (2015). Brain and Behavioral Lateralization in Animals. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 799–805). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.53082-7>
97. Ross-Sheehy, S., Oakes, L. M., & Luck, S. J. (2011). Exogenous attention influences visual short-term memory in infants. *Developmental Science*, 14(3), 490–501.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00992.x>
98. Rouder, J. N., Morey, R. D., Morey, C. C., & Cowan, N. (2011). How to measure working memory capacity in the change detection paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(2), 324–330. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0055-3>
99. Ruben, R. (1997). A Time Frame of Critical/Sensitive Periods of Language Development. *Acta Oto-Laryngologica*, 117, 202–205. <https://doi.org/10.1007/BF02996542>
100. Rypma, B., Prabhakaran, V., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1999). Load-dependent roles of frontal brain regions in the maintenance of working memory. *NeuroImage*, 9(2), 216–226. <https://doi.org/10.1006/nimg.1998.0404>
101. Sander, M. C., Maier, P. M., Napiórkowski, N., Finke, K., Töllner, T., Müller, H. J., Lindenberger, U., Werkle-Bergner, M., & Wiegand, I. (2019). Age Differences in Hemispheric Lateralization in Spatial and Verbal Visual Working Memory. *BioRxiv*, 577858.
<https://doi.org/10.1101/577858>
102. Sander, M. C., Werkle-Bergner, M., & Lindenberger, U. (2011). Binding and strategic selection in working memory: A lifespan dissociation. *Psychology and Aging*, 26(3), 612–624. <https://doi.org/10.1037/a0023055>
103. Sawangjit, A., Oyanedel, C. N., Niethard, N., Salazar, C., Born, J., & Inostroza, M. (2018). The hippocampus is crucial for forming non-hippocampal long-term memory during sleep. *Nature*, 564(7734), 109–113. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0716-8>
104. Schmidt, H., Jogia, J., Fast, K., Christodoulou, T., Haldane, M., Kumari, V., & Frangou, S. (2009). No gender differences in brain activation during the N-back task: An fMRI study in healthy individuals. *Human Brain Mapping*, 30(11), 3609–3615.
<https://doi.org/10.1002/hbm.20783>
105. Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Constable, R. T., Skudlarski, P., Fulbright, R. K., Bronen, R. A., Fletcher, J. M., Shankweiler, D. P., & Katz, L. (1995). Sex differences in the functional organization of the brain for language. *Nature*, 373(6515), 607–609.
<https://doi.org/10.1038/373607a0>

106. Sherman, J. (1979). Cognitive performance as a function of sex and handedness: An evaluation of the Levy hypothesis. *Psychology of Women Quarterly*, 3(4), 378–390. <https://doi.org/10.1111/j.1471-6402.1979.tb00687.x>
107. Sowell, E. R., Thompson, P. M., Leonard, C. M., Welcome, S. E., Kan, E., & Toga, A. W. (2004). Longitudinal mapping of cortical thickness and brain growth in normal children. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 24(38), 8223–8231. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1798-04.2004>
108. Springer, S. P., & Deutsch, G. (1981). Left brain, right brain. *Undefined*. /paper/Left-brain%2C-right-brain-Springer-Deutsch/01bd295a28515022dde5717ea8e1efb10b46519a
109. Tremblay, P., & Dick, A. S. (2016). Broca and Wernicke are dead, or moving past the classic model of language neurobiology. *Brain and Language*, 162, 60–71. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.08.004>
110. Tripathy, S. P., & Ögmen, H. (2018). Sensory memory is allocated exclusively to the current event-segment. *Frontiers in Psychology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01435>
111. Tulving, E., & Craik, F. I. M. (2000). *The Oxford Handbook of Memory*. Oxford University Press.
112. Ullman, M. T. (2001). The declarative/procedural model of lexicon and grammar. *Journal of Psycholinguistic Research*, 30(1), 37–69. <https://doi.org/10.1023/a:1005204207369>
113. Ullman, Michael T. (2006). The declarative/procedural model and the shallow structure hypothesis. *Applied Psycholinguistics*, 27(1), 97–105. <https://doi.org/10.1017/S0142716406370038>
114. Van der Haegen, L., Westerhausen, R., Hugdahl, K., & Brysbaert, M. (2013). Speech dominance is a better predictor of functional brain asymmetry than handedness: A combined fMRI word generation and behavioral dichotic listening study. *Neuropsychologia*, 51(1), 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.11.002>
115. Vigneau, M., Beaucousin, V., Hervé, P. Y., Duffau, H., Crivello, F., Houdé, O., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2006). Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing. *NeuroImage*, 30(4), 1414–1432. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.11.002>
116. Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, 428(6984), 748–751. <https://doi.org/10.1038/nature02447>
117. Voyer, D. (2011). Sex differences in dichotic listening. *Brain and Cognition*, 76(2), 245–255. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2011.02.001>

118. Wiegand, I., Lauritzen, M. J., Osler, M., Mortensen, E. L., Rostrup, E., Rask, L., Richard, N., Horwitz, A., Benedek, K., Vangkilde, S., & Petersen, A. (2018). EEG correlates of visual short-term memory in older age vary with adult lifespan cognitive development. *Neurobiology of Aging*, *62*, 210–220. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2017.10.018>
119. Wiegand, I., Töllner, T., Dyrholm, M., Müller, H. J., Bundesen, C., & Finke, K. (2014). Neural correlates of age-related decline and compensation in visual attention capacity. *Neurobiology of Aging*, *35*(9), 2161–2173. <https://doi.org/10.1016/j.neurobiolaging.2014.02.023>
120. Willemin, J., Hausmann, M., Brysbaert, M., Dael, N., Chmetz, F., Fioravera, A., Gieruc, K., & Mohr, C. (2016). Stability of right visual field advantage in an international lateralized lexical decision task irrespective of participants' sex, handedness or bilingualism. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, *21*(4–6), 502–524. <https://doi.org/10.1080/1357650X.2015.1130716>
121. Zaidel, E. (2001). Brain Asymmetry. In N. J. Smelser & P. B. Baltes (Eds.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 1321–1329). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/03548-8>