

**Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II**

**Wydział Nauk Społecznych**

Instytut Psychologii

Marcin Wojtasiński

Nr albumu 127493

**WPLYW PRZEWIDYWALNOŚCI EKSPOZYCJI BODŹCA DŹWIĘKOWEGO  
NA ORIENTACJĘ UWAGI SŁUCHOWEJ**

Rozprawa doktorska

napisana na seminarium z Psychologii Procesów Poznawczych

pod kierunkiem promotora dr. hab. Tomasza Jankowskiego

i promotora pomocniczego dr. Przemysława Tuźnika

Lublin 2022

Dziękuję żonie, synowi, rodzicom, przyjaciołom,  
profesorowi Piotrowi Francuzowi za poświęcony czas,  
dzięki któremu mogłem znaleźć swoje miejsce.

## Spis treści

Streszczenie .....	5
Abstract .....	11
Wstęp .....	16
1. Orientacja uwagi.....	18
1.1.    Klasyczne teorie uwagi .....	18
1.2.    Doświadczenie jako mechanizm ukierunkowujący uwagę .....	21
1.3.    Współczesne modele uwagi słuchowej.....	25
1.3.1.    Modele bottom-up uwagi słuchowej .....	25
1.3.2.    Modele top-down uwagi słuchowej.....	28
1.3.3.    Integracja modeli uwagi słuchowej .....	29
1.4.    Etapy procesu uwagowego .....	31
1.4.1.    Czteroetapowy model uwagi Eimera .....	31
1.4.2.    Czynniki wpływające na proces przetwarzania .....	33
1.4.2.1.    Rola zadania.....	33
1.4.2.2.    Rola kontekstu: typ sceny akustycznej.....	34
1.5.    Walidacja modeli oraz biologiczne podłoże uwagi słuchowej .....	35
1.5.1.    Metody pomiaru uwagi .....	35
1.5.2.    Biologiczne podłoże mechanizmów kierujących uwagę.....	37
1.5.3.    Wyniki badań elektrofizjologicznych .....	38
1.5.4.    Strumienie uwagi słuchowej: co, gdzie i kiedy .....	40
2. Przewidywalność .....	44
2.1.    Paradygmaty badawcze podejmujące zagadnienie przewidywalności.....	44
2.2.    Zasada częstości .....	48
2.3.    Przewidywalna częstość w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo- przestrzennym.....	49
2.4.    Zasada kolejności.....	51
2.5.    Przewidywalna kolejność w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo- przestrzennym.....	52
2.6.    Badania nad rolą przewidywalności w złożonej scenie akustycznej .....	54
2.7.    Teoria Kodowania Predykcyjnego .....	57
3. Mechanizm wpływu przewidywalności bodźców słuchowych na orientację uwagi w zadaniach percepcyjnych .....	60
3.1.    Relacja między przewidywalnością a uwagę .....	60
3.2.    Badania własne.....	65
3.2.1.    Prosta scena akustyczna: zasada częstości.....	66

3.2.2.	Prosta scena akustyczna: zasada kolejności .....	71
3.2.3.	Złożona scena akustyczna: zasada częstotliwości .....	74
3.2.4.	Złożona scena akustyczna: zasada kolejności .....	78
3.3.	Podsumowanie .....	81
4.	Metodologia badań .....	85
4.1.	Wprowadzenie .....	85
4.2.	Osoby badane .....	86
4.3.	Materiały i aparatura badawcza .....	87
4.3.1.	Bodźce .....	87
4.3.2.	Aparatura .....	88
4.3.2.1.	Aparatura do prezentacji procedury eksperymentalnej i treningowej oraz ekspozycji bodźców .....	88
4.3.2.2.	Aparatura do rejestracji aktywności bioelektrycznej mózgu .....	88
4.4.	Procedura .....	88
4.4.1.	Typ sceny akustycznej .....	90
4.4.2.	Organizacja statystyczna prób w ramach poszczególnych eksperymentów .....	91
4.5.	Rejestracja sygnału EEG .....	93
4.6.	Strategia analiz .....	93
4.6.1.	Analiza danych behawioralnych .....	93
4.6.2.	Analiza danych elektrofizjologicznych .....	94
5.	Wyniki badań własnych .....	97
5.1.	Eksperyment I: prosta scena akustyczna i zasada częstotliwości .....	97
5.1.1.	Wyniki behawioralne .....	97
5.1.2.	Wyniki badań ERP .....	97
5.1.3.	Podsumowanie .....	101
5.2.	Eksperyment II: zasada przewidywalnej kolejności – prosta scena akustyczna .....	102
5.2.1.	Wyniki behawioralne .....	102
5.2.2.	Wyniki badań ERP .....	102
5.2.3.	Podsumowanie .....	105
5.3.	Eksperyment III: zasada częstotliwości – złożona scena akustyczna .....	105
5.3.1.	Wyniki behawioralne .....	105
5.3.2.	Wyniki badań ERP .....	105
5.3.3.	Podsumowanie .....	109
5.4.	Eksperyment IV: złożona scena akustyczna i zasada kolejności .....	110
5.4.1.	Wyniki behawioralne .....	110
5.4.2.	Wyniki badań ERP .....	110

5.4.3. Podsumowanie.....	114
6. Dyskusja.....	114
6.1. Eksperyment I.....	114
6.2. Eksperyment II.....	118
6.3. Eksperyment III.....	120
6.4. Eksperyment IV.....	123
6.5. Wnioski ogólne.....	125
6.6. Ograniczenie badań własnych.....	127
6.7. Walor praktyczny badań.....	129
6.8. Przyszłe kierunki badań.....	130
6.9. Konkluzja.....	131
Bibliografia.....	133
Aneks.....	181

## Streszczenie

Orientacja uwagi słuchowej oznacza skupienie jej zasobów na cechach dźwięku, czasie jego pojawienia się lub jego lokalizacji (Posner, 1980). Proponowane są trzy mechanizmy ukierunkowujące uwagę: oddolne (ang. *bottom-up*), odgórne (ang. *top-down*) oraz ukierunkowanie za pomocą doświadczenia (ang. *experience*) (Addleman i Jiang, 2019a). Ukierunkowanie oddolne wiąże się z obecnością wyrazistego bodźca (ang. *salient stimuli*), na który mimowolnie zwracamy uwagę. Przykładem może być dźwięk naszego imienia usłyszany w tłumie. Przyjmuje się, że procesy oddolne są automatyczne. Procesy odgórne z kolei związane są z aktualnymi celami, motywacją, wykonywanym zadaniem. W przeciwieństwie do procesów oddolnych, procesy odgórne uznawane są za świadome (Baghdadi i in., 2021). Wiedza na temat roli doświadczenia jest stosunkowo uboga w porównaniu do pierwszych dwóch mechanizmów. Doświadczenie oznacza szeroko rozumiany pakiet mechanizmów mogących skutkować uprzedzeniami uwagowymi (ang. *attentional biases*; Addleman i Jiang, 2019a). Wśród nich znajdują się: uczenie asocjacyjne relacji między wskazówką a celem, uczenie w oparciu o nagrody, a także historia wyboru. Historia wyboru wpływa na ukierunkowanie uwagi poprzez modyfikację prawdopodobieństwa występowania bodźców dzielących cechy z bodźcami poprzednio występującymi. Może zatem dotyczyć efektów krótkotrwałych i długoterminowych. Różnica między uwagą kierowaną odgórnie a tą kierowaną przez historię wyboru polega na okolicznościach, w jakich kształtuje się mapa priorytetów – elementów ważnych dla dalszego przetwarzania (Fecteau i Munoz, 2006). W przypadku uwagi kierowanej odgórnie wysoki priorytet jest nadawany określonym cechom lub wymiarom cech jeszcze przed rozpoczęciem przeszukiwania pola percepcyjnego (Correa i in., 2005). W przypadku uwagi kierowanej historią wyboru wartość wagi uwagowej rośnie w miarę kumulacji doświadczeń, jeśli ich struktura zawiera informację ułatwiającą odnalezienie bodźca docelowego. Aktualne modele uwagi słuchowej uwzględniają mapy priorytetów, które obejmują rolę nie tylko procesów oddolnych i odgórnych, ale także doświadczenia jako istotnie wpływających na przetwarzanie uwagowe (Addleman i Jiang, 2019a; Awh i in., 2012; Chelazzi i in., 2014; Ferrante i in., 2018, Kaya i Elhilali, 2017).

Zagadnienie doświadczenia, a w szczególności historia wyboru, wiąże się nieodłącznie z zagadnieniem przewidywalności. Jedną z najbardziej popularnych aktualnie prób wyjaśnienia przewidywalności podejmuje Teoria Kodowania Predykcyjnego (TKP) (Clark, 2013, 2015; Egner i Summerfield, 2013; Rao i Ballard, 1999). W jej świetle mózg

przewiduje zdarzenia mogące wystąpić w przyszłości. Jeśli zdarzenie odbiega od zakładanego modelu, to oczekiwania dotyczące kolejnych zdarzeń zostają zaktualizowane (ang. *belief updating*). W ramach uczenia się na podstawie doświadczeń model rzeczywistości staje się coraz bardziej precyzyjny. Przewidywalność oznacza możliwość wytworzenia predykcji dotyczących nie tylko tego, jaki bodziec wystąpi, ale także tego, kiedy i gdzie to się stanie. Prawdopodobny czas pojawienia się bodźca często określane jest wymiarem czasowym lub temporalnym, natomiast prawdopodobna lokalizacja – wymiarem przestrzennym. Czy zatem przewidywalność pozwala skupić zasoby uwagi na cesze, lokalizacji lub czasie pojawienia się bodźca w sposób bardziej efektywny niż w przypadku braku przewidywalności?

Badania nad zagadnieniem relacji przewidywalności i uwagi dostarczyły ostatnimi czasy wielu propozycji próbujących opisać relację pomiędzy nimi (Schröger i in., 2015). Mimo licznych kontrowersji – szczególnie w przypadku wymiaru czasowego i przestrzennego – wynikających z niespójnych wyników, a także braku efektów, niezaprzeczalnym jest, że proces przetwarzania informacji zależy zarówno od przewidywalności, jak i samej uwagi (Lange, 2013; Rimmele i in., 2011).

Töllner i in. (2012) zwracają uwagę, że przebieg procesu przetwarzania informacji może zależeć od samej natury zadania, z którym mają do czynienia osoby badane. Innymi słowy – zadania często swobodnie ze sobą zestawiane – jak detekcji, lokalizacji czy dyskryminacji – mogą cechować się różnicami wynikającymi z braku kontroli wielu źródeł zmienności. (jak typ zadania; Correa i in., 2004). Źródłem zmienności jest także kontekst środowiskowy. W przypadku modalności słuchowej głównym kontekstem jest typ sceny akustycznej, z którą mają do czynienia osoby badane: prosta lub złożona (Lewald i Getzmann, 2015). Prosta scena akustyczna dotyczy sytuacji, w której w danym momencie występuje tylko jedno źródło dźwięku, natomiast w przypadku sceny złożonej źródeł jest więcej. Proces uwagi przebiega inaczej w obu typach scen. Obok typu sceny akustycznej źródłem zmienności może być także organizacja statystyczna bodźców użytych w eksperymencie. Addleman i Jiang (2019a) zaznaczają, że kategoria „historia wyboru”, pod którą kryje się uczenie statystyczne, jest dość pojemna. Standardowo wyodrębnić można dwa rodzaje sposobów uczenia statystycznego. Pierwszy sposób dotyczy uczenia się w oparciu o probabilistyczne własności bodźców (zasada częstości; Jabar i in., 2017), natomiast drugi – w oparciu o sekwencyjną naturę kolejnych bodźców w czasie (zasada kolejności; Bregman i Campbell, 1971; Daltrozzo i Conway, 2014). Zasada częstości

pojawiania się bodźców oznacza, że mają one pewien rozkład probabilistyczny, na podstawie którego możemy stwierdzić co najmniej, że pewne bodźce pojawiają się częściej niż inne. Zasada kolejności pojawiania się bodźców oznacza, że podczas prezentacji bodźce te tworzą stałą, powtarzającą się sekwencję (np. dźwięk B pojawia się zawsze po dźwięku A). Obie zasady można zakwalifikować jako rodzaj uczenia statystycznego, który buduje zarazem historię wyboru omawianą przez zespół Addlemana i Jiang (2019a). Zasady częstości i kolejności także ze względu na swoją specyfikę mogą generować pojawienie się lub zniesienie pewnych efektów (np. uwagowych; Lange, 2013). Wydaje się prawdopodobne, że opisane w poprzednim akapicie rozbieżności w wynikach badań łączących uwagę i przewidywalność mogą przynajmniej częściowo wynikać ze stosowania różnych metodologii, definicji, a także paradygmatów badawczych.

Głównym celem projektu była weryfikacja hipotez dotyczących wpływu przewidywalności dźwięku w wymiarze czasowym, przestrzennym oraz czasowo-przestrzennym na orientację uwagi słuchowej w zadaniu dyskryminacji. Dynamika orientacji uwagi słuchowej została opisana na poziomie elektrofizjologicznej aktywności mózgu mierzonej z wykorzystaniem techniki potencjałów wywołanych, skorelowanych ze zdarzeniem (ang. *event-related potentials*, ERPs). Problematyka podjętych badań zbiega się z próbą odpowiedzi na następujące pytania:

- (1) Czy przewidywalna częstość i kolejność ekspozycji dźwięku w wymiarze czasowym, przestrzennym oraz czasowo-przestrzennym wpływa na orientację uwagi słuchowej w prostych i złożonych scenach akustycznych?
- (2) Jak ta przewidywalność wpływa na elektrofizjologiczną aktywność mózgu związaną z orientacją uwagi słuchowej?

Postulowana facylitacja związana z przewidywalnością pojawiania się dźwięku w wymiarze czasowym i przestrzennym przejawiać się miała zarówno na poziomie behawioralnym (czas reakcji), jak i elektrofizjologicznym (amplituda generowanych potencjałów). W literaturze dotyczącej relacji między przewidywalnością a uwagą obecne są dwa charakterystyczne potencjały wywołane opisujące wczesne i późne etapy przetwarzania. Komponentem wczesnego przetwarzania jest N1, który wywoływany jest przez pojawienie się dźwięku i generowany w korze słuchowej (Liegeois-Chauvel i in., 1994; Näätänen i Picton, 1987). W świetle obecnej literatury komponent N1 zależny jest zarówno od przewidywalności, jak i uwagi (Lange, 2013). Choć często przyjmuje się



odgórne założenie, że przewidywalność osłabia amplitudę N1, a uwaga wzmacnia, to ostatnie badania (oraz ustalenia w ramach Teorii Kodowania Predykcyjnego) uszczegóławiają naturę odmiennego wpływu predykcji i uwagi na N1. Sytuacja probabilistyczna o charakterystyce ryzyka skutkuje częstym uaktualnianiem systemu przekonań, co prowadzi do wzrostu amplitudy N1 w odpowiedzi na bodźce oczekiwane (Doherty i in., 2005; Rimmele i in., 2011; Tervaniemi i in., 1994), które można przypisać modulacji uwagi. Różnice w zakresie wpływu uwagi i przewidywalności na komponent N1 można wyjaśnić, traktując obie jako synergiczne formy wnioskowania percepcyjnego. Innymi słowy, wzmocnienie komponentu N1 obserwowane jest dla przewidywanych (bardziej prawdopodobnych) danych wejściowych, gdy oczekuje się, że będą one bardziej precyzyjne (Hohwy, 2012; Kok i in., 2012). Komponent P3 uznawany jest za późny efekt związany z zadaniem i niezależny od modalności bodźca. Wiąże się z oczekiwaniami dotyczącymi czasu (Lange, 2012), a także czasu i lokalizacji (Rimmele i in., 2011) pojawienia się bodźców. Wielkość amplitudy komponentu P3 skorelowana jest ze stopniem integracji informacji płynących z różnych modalności celem efektywnego procesu ewaluacji, aktualizacji bieżącego kontekstu czy procesami kontroli uwagowej (Donchin i Coles, 1988; Kutas i in., 1977; Verleger, 1988). Uważany jest także za korelat apriorycznego prawdopodobieństwa występujących bodźców (Kopp i in., 2016).

By odpowiedzieć na pytania badawcze, zaplanowano cztery eksperymenty, które powstały w oparciu o typ sceny akustycznej (prosta, złożona) oraz zasadę uczenia się przewidywalności (częstości, kolejności). Eksperymenty cechowały się zatem następującymi własnościami: eksperyment I: prosta scena akustyczna, zasada częstości (N = 19); eksperyment II: prosta scena akustyczna, zasada kolejności (N = 20); eksperyment III: złożona scena akustyczna, zasada częstości (N = 19); eksperyment IV: złożona scena akustyczna, zasada kolejności (N = 20). Celem osoby badanej było wykonanie zadania dyskryminacji polegającego na rozróżnieniu dwóch dźwięków – prostego od złożonego. Podczas gdy osoba zajęta była zadaniem, w sposób utajony przekazywano zasadę częstości lub kolejności. Zasada częstości dotyczyła częstszego pojawiania się bodźca w pewnych lokalizacjach (warunek przestrzenny), w określonym punkcie w czasie (warunek czasowy) lub w pewnej lokalizacji i określonym punkcie w czasie (warunek czasowo-przestrzenny). Jej przeciwieństwem (warunkiem kontrolnym) była sytuacja losowych (jednakowo prawdopodobnych) lokalizacji i czasów pojawienia się bodźców. W przypadku zasady kolejności lokalizacje (warunek przestrzenny), interwały

(warunek czasowy) lub lokalizacje i interwały (warunek czasowo-przestrzenny) tworzyły w ramach kolejnych prób stałą określoną przed badaniem 4-elementową sekwencję (element = pojawienie się bodźca w określonym miejscu i/lub czasie).

W wyniku przeprowadzonego badania udało się zaobserwować szereg podobieństw między eksperymentami. Skrócenie czasów reakcji możliwe było do zaobserwowania wyłącznie dla zasady częstości (eksperyment I i III). Dla prostej sceny akustycznej (eksperyment I) efekt dotyczył wymiaru czasowo-przestrzennego, natomiast dla złożonej sceny akustycznej (eksperyment III) – wymiaru czasowego. Eksperymenty I i III były jedynymi, w których można było zaobserwować wyższą amplitudę komponentu P3 dla wymiaru czasowo-przestrzennego w porównaniu do braku przewidywalności (bez względu na typ sceny akustycznej). W przypadku zasady kolejności tego typu integracja czasowo-przestrzenna była możliwa do zaobserwowania dla komponentu wczesnego (N1). Zasady częstości oraz kolejności wyłoniły odrębną ważność wymiarów przewidywalności – zasada kolejności pozwoliła zaobserwować facylitacyjną rolę wskazówki przestrzennej, natomiast zasada częstości – wymiaru czasowego. Odmienne funkcje obu typów uczenia się wnoszą wkład do wiedzy o trzecim czynniku orientującym uwagę słuchową – doświadczeniu (w szczególności historii wyboru; Addleman i Jiang, 2019a). Efekt wzrostu amplitudy N1 w każdym z eksperymentów wnosi dodatkową wiedzę do dyskusji dotyczącej odmiennych wpływów przewidywalności i uwagi na ten komponent (Lange, 2013). O ile odseparowanie zasad częstości i kolejności pozwoliło zaobserwować zróżnicowany wpływ przewidywalności czasowej i przestrzennej, to typ sceny akustycznej odegrał rolę w budowaniu użyteczności korzystania ze wskazówki przestrzennej. Złożona scena akustyczna, uważana za percepcyjnie trudniejszą (Lewald i Getzmann, 2015), mogła zaangażować korzystanie z informacji przestrzennej celem efektywniejszego wykonania zadania – tak, że efekt facylitacji przewidywalności przestrzennej zaobserwowany został dla obu zasad uczenia się statystycznego.

Odpowiedź na pytanie dotyczące tego, czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo-przestrzennym odgrywa rolę w orientacji uwagi słuchowej jest niejednoznaczna. Töllner i in. (2012) proponują, że rozbieżności w wynikach badań często związane są z wariacją wynikającą ze stosowania różnych zadań, paradygmatów i kontekstów. Zespół Schrögera i in. (2015) zwraca z kolei uwagę na definicyjne i metodologiczne aspekty potencjalnych niezgodności. Powyższe obserwacje przyczyniły się do podjęcia w niniejszym projekcie próby kontroli

czynników wpływających na wariację wyników uzyskiwanych w badaniach nad relacją między przewidywalnością a uwagą. Uwzględnienie trzeciego mechanizmu ukierunkowującego uwagę – historii wyboru proponowanej przez Addlemana i Jiang (2019a), rozdzielenie zróżnicowanych w sposobie przetwarzania typów scen akustycznych (Lewald i Getzmann, 2015) oraz rodzajów uczenia się statystycznego (Lange, 2013), a także wykorzystanie wiedzy o mapach priorytetów uwzględniających aspekt przewidywalności (Kaya i Elhilali, 2014) pozwoliło na obserwację roli przewidywalności w każdym z tych warunków. W kontekście pytania drugiego związanego z elektrofizjologicznymi korelatami procesu facylitacji, interpretacja oparta na Teorii Kodowania Predykcyjnego (Hohwy, 2012, 2013), a także odniesienie do etapów przetwarzania uwagi (Eimer, 2014; Posner, 1980; Schröger i in., 2015; Treisman i Gelade, 1980) pozwoliły na poszerzenie wiedzy dotyczącej nie tylko aspektu behawioralnego facylitacji, ale także czasowego przebiegu procesu uwagowego.

## Abstract

Orientation of auditory attention means focusing its resources on the features of a sound, the time of its appearance, or its location (Posner, 1980). Three mechanisms are proposed for orienting attention: bottom-up, top-down, and orientation by experience (Addleman and Jiang, 2019a). Bottom-up orientation involves the presence of a salient stimulus to which we involuntarily direct our attention. One example is the sound of our name heard in a crowd. Bottom-up processes are assumed to be automatic. Top-down processes, on the other hand, are related to current goals, motivation, and the performed task. In contrast to bottom-up processes, top-down processes are considered conscious (Baghdadi et al., 2021). Knowledge of the role of experience is relatively deficient compared to the first two mechanisms. Experience implies a broad package of mechanisms that can result in attentional biases (Addleman and Jiang, 2019a). Among them are associative learning of the cue-target relationship, reward-based learning, and selection history. Selection history affects attentional targeting by modifying the probability of stimuli that share features with previously occurring stimuli. Thus, it can involve short-term and long-term effects. The difference between top-down guided attention and that guided by selection history relies on the circumstances under which the priority map – including components important for further processing – is formed. In the case of top-down guided attention, high priority is given to certain features or feature dimensions even before the perceptual field is searched. In the case of selection history-guided attention, the value of attentional weight increases as experiences accumulate, if their structure contains information that facilitates finding the target stimulus. Current models of auditory attention consider priority maps that include the role of not only bottom-up and top-down processes but also experience as significantly influencing attentional processing (Addleman and Jiang, 2019a; Awh et al., 2012; Chelazzi et al., 2014; Ferrante et al., 2018, Kaya and Elhilali, 2017).

The issue of experience, and in particular selection history, is inherently linked to the issue of predictability. One of the most currently popular attempts to explain predictability is undertaken by the Theory of Predictive Coding (Clark, 2013, 2015; Egnér and Summerfield, 2013; Rao and Ballard, 1999). In its light, the brain predicts events likely to occur in the future. If an event deviates from the assumed model, expectations of subsequent events are updated (belief updating). Under experiential learning, the model of reality becomes more and more accurate. Predictability refers to the ability to produce

predictions about not only what stimulus will occur, but also when and where it will happen. The likely time of a stimulus's occurrence is often referred to as the time or temporal dimension, while the likely location is referred to as the spatial dimension. Does predictability affect the orientation of attentional resources on the feature, location or time of stimulus occurrence more effectively than in a situation with no predictability?

Research on the issue of the relationship between predictability and attention has recently provided several proposals attempting to describe the relationship between these two (Schröger et al., 2015). Despite the many controversies – especially in the case of the temporal and spatial dimensions – in the form of opposing results, as well as lack of effects, it is undeniable that the processing of information depends on both predictability and attention itself (Lange, 2013; Rimmele et al., 2011).

Töllner et al. (2012) point out that the course of information processing may depend on the nature of the task respondents are dealing with. In other words - tasks that are often freely juxtaposed - such as detection, localization, or discrimination - may be characterized by differences due to a lack of control of multiple sources of variability (like the type of task). Environmental context is also a source of variability. In the case of auditory modality, the main context is the type of acoustic scene the subjects are dealing with: simple or complex (Lewald and Getzmann, 2015). A simple acoustic scene refers to a situation in which there is only one sound source at a time, while in the case of a complex scene there are more sources. The process of attention proceeds differently in both types of scenes. In addition to the type of acoustic scene, the statistical organization of the stimuli used in the experiment can also be a source of variability. Addleman and Jiang (2019a) point out that the category "selection history", under which statistical learning falls, is quite capacious. Normally, two types of statistical learning can be distinguished. The first way concerns learning based on the probabilistic properties of stimuli (frequency rule) (Jabar et al., 2017), while the second is based on the sequential nature of successive stimuli over time (order rule) (Daltrozzo and Conway, 2014). The frequency rule of stimuli appearance means that they have a specific probabilistic distribution, based on which we can at least conclude that some stimuli appear more frequently than others. The order rule of stimuli appearance means that during the presentation, the stimuli form a fixed, repeating sequence (e.g., sound B always appears after sound A). Both rules can be classified as a type of statistical learning, which also builds up the selection history discussed by Addleman and Jiang (2019a). Due to their specificity, frequency and order rules can generate

the appearance or abolition of certain effects (e.g., attentional) (Lange, 2013). It seems likely that the discrepancies in the results of studies linking attention and predictability described in the previous paragraph may be at least partly due to the use of different methodologies, definitions, as well as research paradigms.

The main aim of the present project was to verify hypotheses regarding the influence of temporal, spatial and spatio-temporal sound predictability on auditory attention orientation in a discrimination task. Auditory attention orientation dynamics were described at the electrophysiological brain activity level measured using the event-related potentials (ERPs) technique. The undertaken research problems coincide with an attempt to answer the following questions:

- (1) Does the predictable frequency and order of sound exposure in the temporal, spatial and temporal-spatial dimensions affect the orientation of auditory attention in simple and complex acoustic scenes?
- (2) How does this predictability affect electrophysiological brain activity related to auditory attention orientation?

The postulated facilitation associated with the predictability of sound emergence in the temporal and spatial dimensions appeared to be manifested at both the behavioral (reaction time) and electrophysiological (amplitude of ERPs) levels. In the literature on the relationship between predictability and attention, two characteristic ERPs describing early and late stages of processing are present. The early processing component is N1, which is evoked by the onset of sound and generated in the auditory cortex (Liegeois-Chauvel et al., 1994; Näätänen and Picton, 1987). According to the current literature, the N1 component depends on both predictability and attention (Lange, 2013). While it is often an assumption that predictability weakens N1 amplitude and attention strengthens it, recent research (and findings within Predictive Coding Theory) detail the nature of the different effects of prediction and attention on N1. A probabilistic situation with risk characteristics results in frequent updating of the belief system, leading to an increase in N1 amplitude in response to anticipatory stimuli (Doherty et al., 2005; Rimmele et al., 2011; Tervaniemi et al., 1994), which can be attributed to attentional modulation. The differences in the effects of attention and predictability on the N1 component can be explained by treating both as synergistic forms of perceptual inference. In other words, enhancement of the N1 component is observed for predicted (more likely) inputs

when they are expected to be more precise (Hohwy, 2012; Kok et al., 2012). The P3 component is considered a late effect related to the task and independent of the stimulus modality. It is associated with expectations of timing (Lange, 2012), as well as time and location (Rimmele et al., 2011) of stimulus onset. The magnitude of the P3 amplitude is correlated with the degree of integration of information coming from different modalities for an effective evaluation process, updating the current context or attentional control processes (Donchin and Coles, 1988; Kutas et al., 1977; Verleger, 1988). It is also considered a correlate of the apriori probability of occurring stimuli (Kopp et al., 2016).

To answer the research questions, four experiments were planned based on the type of acoustic scene (simple, complex) and the rule of learning predictability (frequency, order). Thus, the experiments were characterized as follows: experiment I: simple acoustic scene, frequency rule (N = 19); experiment II: simple acoustic scene, order rule (N = 20); experiment III: complex acoustic scene, frequency rule (N = 19); experiment IV: complex acoustic scene, order rule (N = 20). The subject's goal was to perform the discrimination task that involved distinguishing between two sounds – pure tone and complex sound. While the subject was engaged in the task, a frequency or order rule was implicitly conveyed. The frequency rule referred to the stimulus appearing more frequently at certain locations (spatial condition), at a certain point in time (temporal condition) or at a certain location and a certain point in time (temporal-spatial condition). Its opposite (control condition) was the situation of random (equally likely) locations and times of appearance of stimuli. In the case of the order rule, locations (spatial condition), intervals (temporal condition) or locations and intervals (temporal-spatial condition) formed a fixed 4-element sequence (element = appearance of a stimulus at a certain location and/or time) within successive trials.

As a result of the study, it was possible to observe several similarities between the experiments. A reduction in response times could only be observed for the frequency rule (Experiments I and III). For a simple acoustic scene (experiment I), the effect was observed in the time-space dimension, while for a complex acoustic scene (experiment III) it was in the time dimension. Experiments I and III were the only ones in which a higher amplitude of the P3 component could be observed for the temporal-spatial dimension compared to the lack of predictability (regardless of the type of acoustic scene). In the case of the order rule, such spatio-temporal integration was observable for the early component

(N1). Frequency and order rules emerged as separate validity of predictability dimensions – the order rule made it possible to observe the facilitation role of the spatial cue, while the frequency rule – of the temporal dimension. The distinct functions of the two types of learning contribute to the knowledge of the third orienting factor of auditory attention – experience (in particular, selection history; Addleman and Jiang, 2019a). The effect of an increase in N1 amplitude in each experiment contributes additional knowledge to the discussion of the different effects of predictability and attention on this component (Lange, 2013). While the separation of frequency and order rules made it possible to observe the differential effects of temporal and spatial predictability, the type of acoustic scene played a role in building the utility of using a spatial cue. A complex acoustic scene, considered perceptually more difficult (Lewald and Getzmann, 2015), was able to engage the use of spatial information to perform the task more efficiently – so that a facilitation effect of spatial predictability was observed for both statistical learning rules.

The answer to the question of whether predictable stimulus exposure in the temporal, spatial, and spatio-temporal dimensions plays a role in auditory attention orientation is not clear. Töllner et al. (2012) propose that discrepancies in research results are often related to the variance resulting from the use of different tasks, paradigms and contexts. Schröger et al. (2015), in turn, draw attention to the definitional and methodological aspects of potential inconsistencies. The above observations were the reason for the current project's attempt to control the factors influencing the variance in the results obtained in studies on the relationship between predictability and attention. Consideration of the third attention-directing mechanism, the selection history proposed by Addleman and Jiang (2019a), separation of acoustic scene types that vary in processing (Lewald and Getzmann, 2015), types of statistical learning (Lange, 2013), and the use of knowledge of priority maps that take into account the predictability aspect (Kaya and Elhilali, 2014) made it possible to observe the role of predictability in each of these conditions. In the context of the second question related to the electrophysiological correlates of the facilitation process, an interpretation based on Predictive Coding Theory (Hohwy, 2012, 2013), as well as a reference to the stages of attentional processing (Eimer, 2014; Posner, 1980; Schröger et al., 2015; Treisman and Gelade, 1980) made it possible to expand knowledge regarding not only the behavioral aspect of facilitation but also the temporal course of the attentional process.



## Wstęp

Głównym celem projektu była weryfikacja hipotez dotyczących wpływu przewidywalności dźwięku w wymiarze czasowym, przestrzennym oraz czasowo-przestrzennym na orientację uwagi słuchowej w zadaniu dyskryminacji. Dynamika orientacji uwagi słuchowej została opisana na poziomie elektrofizjologicznej aktywności mózgu mierzonej z wykorzystaniem techniki potencjałów wywołanych, skorelowanych ze zdarzeniem (ang. *event-related potentials*, ERPs). Problematyka podjętych badań zbiega się z próbą odpowiedzi na następujące pytania:

Czy przewidywalna częstość i kolejność ekspozycji dźwięku w wymiarze czasowym, przestrzennym oraz czasowo-przestrzennym wpływa na orientację uwagi słuchowej w prostych i złożonych scenach akustycznych?

Jak ta przewidywalność wpływa na elektrofizjologiczną aktywność mózgu związaną z orientacją uwagi słuchowej?

Rozdział 1 poświęcony jest zagadnieniu uwagi. Na wstępie omówione zostały tradycyjne paradygmaty badań nad uwagą. Przedstawiona jest też koncepcja mechanizmów ukierunkowujących uwagę – wraz z propozycją trzeciego (obok procesów oddolnych i odgórnych) czynnika – doświadczenia (Addleman i Jiang, 2019a). Kolejną część poświęcono omówieniu współczesnych teorii uwagi słuchowej związanych z modelami obliczeniowymi. W szczególności skupiono się na propozycjach uwzględniających każdy z trzech wspomnianych mechanizmów kierujących uwagą – jak model Kaya i Elhilali (2014). Następnym krokiem jest omówienie najpopularniejszych propozycji uwzględniających dynamikę procesu uwagowego – koncepcji Posnera (1980), propozycji Treisman i Gelade (1980) oraz 4-etapowego mechanizmu uwagi Eimera (2014) zaadaptowanego do badań nad uwagą słuchową (Schröger i in., 2015). Ostatnim elementem pierwszego rozdziału jest zarysowanie podłoża biologicznego uwagi, a także wyodrębnienie sposobów jej walidacji.

Rozdział 2 związany jest z problematyką przewidywalności. Przedstawione w nim zostają różne paradygmaty badawcze pozwalające obserwować przewidywalność. Wprowadzony jest także klasyczny podział sposobów uczenia się przewidywalności – w oparciu o zasadę częstości lub kolejności. W następnym kroku przedstawione zostają badania dotyczące przewidywalności w zakresie modalności słuchowej – w szczególności wymiarów przewidywalności: czasowej, przestrzennej i czasowo-przestrzennej oraz

zasady częstości i kolejności. Dalsza część rozdziału poświęcona jest ustaleniom na temat wpływu przewidywalności na przetwarzanie złożonej sceny akustycznej. Ostatni fragment dotyczy opisu neuronalnego funkcjonowania przewidywalności w świetle Teorii Kodowania Predykcyjnego.

Rozdział 3 integruje zagadnienia przedstawione w obu poprzednich rozdziałach – zostają w nim przybliżone różne koncepcje ujmujące relację pomiędzy uwagą a przewidywalnością. Teoria Kodowania Predykcyjnego stanowi tutaj ramy i przestrzeń pozwalającą na integrację obserwowanych niezgodności w wynikach badań. W kolejnym kroku omówione zostają badania dotyczące wpływu przewidywalności w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo-przestrzennym na orientację uwagi słuchowej. Rozdział 3 zwięźzony zostaje propozycją badań własnych, a także sformułowaniem hipotez badawczych.

Na rozdział 4 składa się opis metodologii badawczej. W szczególności dotyczy to charakterystyki przebadanej próby, informacji o użytych w badaniu bodźcach, procedury eksperymentów, a także strategii analiz statystycznych.

W ramach rozdziału 5 prezentowane są wyniki czterech eksperymentów: prostej sceny akustycznej i zasady częstości, prostej sceny akustycznej i zasady kolejności, złożonej sceny akustycznej i zasady częstości oraz złożonej sceny akustycznej i zasady kolejności. Dla każdego z eksperymentów wyodrębniono część poświęconą wynikom behawioralnym i elektrofizjologicznym.

Rozdział 6 obejmuje dyskusję wyników, która w pierwszej kolejności poświęcona jest odrębnie każdemu z przeprowadzonych eksperymentów. Następnie przedstawione zostają konkluzje wspólne dla przeprowadzonych badań. Zaprezentowano także ograniczenia badań własnych, walor aplikacyjny podjętego problemu, przyszłe kierunki rozwoju omawianej problematyki, a także ogólne podsumowanie przeprowadzonych badań.

## 1. Orientacja uwagi

### 1.1. Klasyczne teorie uwagi

Ponad 130 lat temu James (1890) podjął temat uwagi i zdefiniował ją jako „objęcie przez umysł, w jasnej i żywej formie, jednego z tego, co może wydawać się kilkoma jednocześnie możliwymi obiektami lub ciągami myśli” (s. 402-403). Dziś uwaga jest jednym z kluczowych konstruktów teoretycznych psychologii poznawczej (Fawcett i in., 2015; Fu i in., 2020). W ogólnym ujęciu odnosi się do alokacji zasobów neuronalnego przetwarzania (Anderson, 2005; Cohen, 2014; Wixted i Serences, 2018). Proces ukierunkowania uwagi odbywa się zarówno w ramach, jak i między poszczególnymi modalnościami sensorycznymi – wzrokową, słuchową, węchową, dotykową lub smakową (Baghdadi i in., 2021). Rozstrzygane pytania badawcze często wiążą się z próbą poznania mechanizmów uwagi oraz jej funkcji w ramach każdej modalności, a także stopnia, w jakim te mechanizmy różnią się lub są podobne pomiędzy wspomnianymi domenami (Fu i in., 2020). Ze względu na fakt, że człowiek może przetworzyć w danym czasie ograniczoną ilość informacji, większość koncepcji podejmujących zagadnienie uwagi dotyczyła zagadnienia selekcji. Selekcja uwagi związana jest z nadawaniem priorytetów informacjom istotnym, by poradzić sobie z ograniczeniami systemu przetwarzania (Marsh i Campbell, 2016; Starr i Golob, 2007; Sussman, 2017). W pierwszym etapie prac nad zagadnieniem uwagi starano się zrozumieć obserwowane ograniczenia przetwarzania. Z każdą nową adaptacją badacze próbowali uwzględnić złożoność interakcji między systemami sensorycznymi a procesami poznawczymi wyższego rzędu oraz zastanawiali się, w jaki sposób dane sensoryczne są wybierane do dalszego przetwarzania, a wreszcie uświadamiane (Price i Moncrieff, 2021). Zasadniczo wyodrębnić można dwie grupy modeli konceptualnych, które stanowią podłoże współczesnych teorii uwagi: (1) teorie odnoszące się do mechanizmu filtrowania (uwaga jako filtr) lub (2) teorie podejmujące problem ograniczonej pojemności systemu uwagowego. Zostaną one krótko scharakteryzowane.

Pierwsze koncepcje związane z uwagą dotyczyły natury wyboru informacji istotnych z otoczenia, a także weryfikacji etapu przetwarzania, w którym zachodzi filtrowanie percypowanych treści. Grupa tych teorii często określana jest mianem teorii filtra. Prekursorem porównania mechanizmu uwagi do zasady działania filtra był Broadbent (1958). W świetle proponowanej teorii sygnały wejściowe filtrowane są

w oparciu o predefiniowane cele, a więc zabieg filtrowania dokonywany jest przed wpuszczeniem zasobów do wyższych poziomów przetwarzania (ang. *early filter theory*). Początkowo była to koncepcja typu „wszystko lub nic”. Innymi słowy: zakładano, że filtr nie przepuszczał do dalszego przetwarzania bodźców, które można określić mianem nieistotnych lub dystrakcyjnych. Modyfikację powyższej propozycji zaproponowała Treisman (1960), która stwierdziła, że system uwagowy nie działa jak filtr, a raczej tłumik (ang. *attenuator*), a więc przepuszcza część nieistotnych treści do dalszego przetwarzania (ang. *attenuated filter model*). Deutsch i Deutsch (1963) zaproponowali z kolei model odwrotny względem modelu Broadbenta (1958), w którym filtrowanie zachodzi dopiero po przetworzeniu semantycznym (ang. *late filter theory*). Wyniki badań EEG potwierdziły istnienie obu rodzajów selekcji (wczesnej i późnej), co oznacza, że system uwagi podkreśla znaczenie ważnych bodźców na obu poziomach przetwarzania (Kahneman, 1973).

Inni teoretycy przyjęli podejście odrębne względem mechanizmu filtrowania, opierając się na ograniczonej pojemności systemu uwagi. Ich istotnym wkładem jest przede wszystkim uwzględnianie interakcji pomiędzy procesami percepcyjnymi a procesami poznawczymi wyższych rzędów. Kahneman (1973) zaproponował model pojemności uwagi (ang. *capacity model of attention*). Ze względu na skończoną liczbę systemów przetwarzania, ich pojemność jest alokowana na wykonanie zadania według pewnego klucza. Kluczem tym mogą być aktualne intencje, cele, ale także poziom pobudzenia itd. W kolejnym kroku dochodzi do ewaluacji i ewentualnej zmiany polityki alokacji. Wickens (2002), autor teorii wielu zasobów (ang. *multiple-resource theory*) zaproponował, że jest kilka zasobów uwagowych, ale czasem w sytuacji wielu zadań następuje rywalizacja, gdy bodźce do przetworzenia odwołują się do tych samych zasobów.

Posner (1980) w wyjaśnianiu zjawisk związanych z uwagą posłużył się teorią reflektora – skoro uwaga oznacza alokację zasobów, które są ograniczone, to powinna przypominać reflektor. Obiekty w jego centrum przyciągają uwagę. Z kolei przeniesienie reflektora to przeniesienie uwagi. Koncepcja Posnera związana jest także z trzema elementarnymi systemami uwagowymi: mechanizmem aktywacyjnym/wzbudzeniowym (ang. *alerting*), orientacyjnym (ang. *orienting*) oraz zarządczym/wykonawczym (ang. *executive attention*). Pierwszy z etapów wiąże się z przygotowaniem systemu poznawczego do odbioru i przetworzenia bodźca. Reorientacja uwagi związana jest z selekcją bodźców, wybranych cech lub ważnych aspektów bodźca (lub skupienia na wybranych treściach pamięci). Wybór ten może być oparty na procesie wstępującym

(informacje z narządów zmysłów) lub zstępującym (wiedza, pamięć długotrwała), a więc kolejno uwadze mimowolnej (egzogenicznej) lub wolicjonalnej (endogenicznej). Ostatni etap związany z funkcjami zarządczymi (ang. *executive*) dotyczy selekcji reakcji, kontroli działania i jego skutków. Jonides (1983) rozwinął koncepcję Posnera i zaproponował, że reflektor może mieć różne średnice. Koncepcję tę nazwano teorią soczewek (ang. *zoom lens*; Castiello i Umiltà, 1990). Oznacza to, że uwaga może być przeniesiona między detalami a ogólnym obiektem dzięki zmianie średnicy promieniowania reflektora. Wykorzystując metaforę reflektora, Kramer i Hahn (1995) zaproponowali, że może on dzielić swoje promienie na wiele obiektów równoległe, co wiązało się z podzielnością uwagi.

Część klasycznych koncepcji dotyczyła natury przetwarzania konkurujących ze sobą bodźców. Treisman i Gelade (1980) podjęli zagadnienie roli uwagi w selekcji i integracji informacji. W teorii integracji cech zaproponowali, że cechy obiektów mogą być wydobyte równoległe, ale identyfikacja obiektów wykonywana jest w określonej kolejności. Model składa się z dwóch etapów – ekstrakcji cech i kombinacji cech oraz identyfikacji obiektu. Dokładniej, przetwarzanie uwagi oraz ukierunkowanie jej w stronę bodźca dokonuje się w dwóch krokach – przeduwagowym (ang. *preattentive*) oraz uwagowym (ang. *attentive*). Pierwszy etap zachodzi szybko, bodźce mogą być równoległe przetwarzane, a charakterystyka bodźców jest wydobyta, ale w dość ogólnej (powierzchowej) formie (Fu i in., 2020). Tylko istotne, zauważalne, wyraźne obiekty są identyfikowalne (Wolfe, 2003). Etap uwagowy z kolei wykonywany jest, by znaleźć klarowną reprezentację służącą identyfikacji obiektu. Selekcja dokonuje się w sposób kontrolowany – przy rozważeniu celów i ograniczeń uwagi (Theeuwes, 1993). Desimone i Duncan (1995) w modelu uprzedzonego współzawodnictwa (ang. *biased competition model*) zaproponowali, że konkurencja między bodźcami jest wynikiem ograniczonych zasobów przetwarzania. Uwaga może poprawić percepcję jednego lub wielu bodźców. W tej koncepcji radzenie sobie z dystraktorami podobnymi do bodźców docelowych jest trudniejsze i wymaga więcej uwagi.

Bez względu na grupę wspomnianych wyżej teorii, procesy selekcji ułatwiają uniknięcie przeciążenia nieistotnymi informacjami (Carrasco, 2011; Chica i in., 2013; Desimone i Duncan, 1995; Knudsen, 2007; Petersen i Posner, 2012). Część badaczy uważa, że orientacja uwagi stanowi przestrzeń rywalizacji zewnętrznych wymagań (ang. *external demands*) i wewnętrznych celów (ang. *internal goals*) (Berger i in., 2005; Chica i in., 2013).

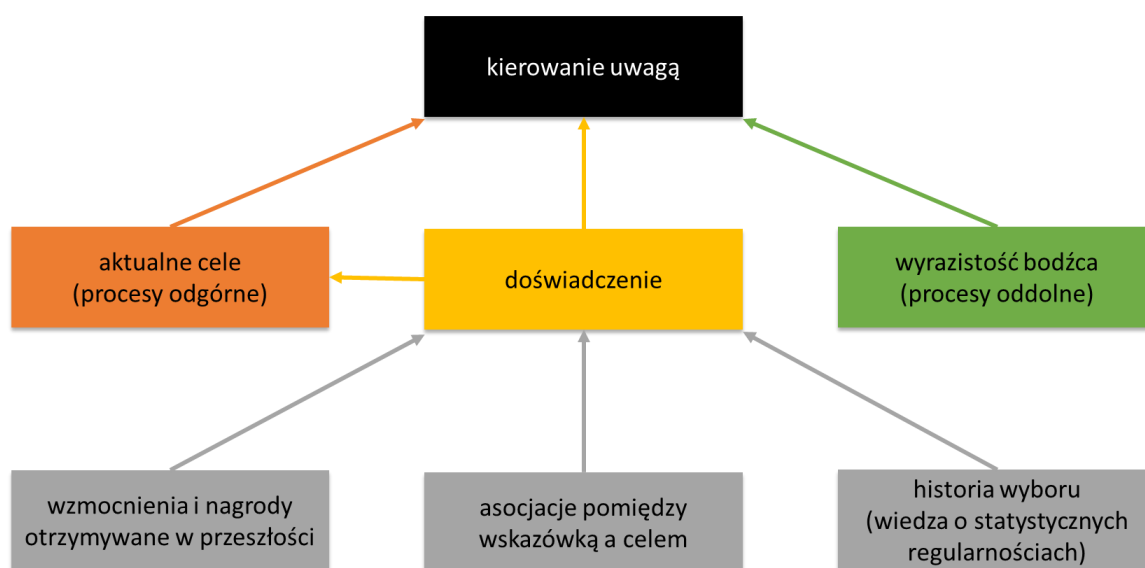
W ramach klasycznego podziału uwzględnia się dychotomizację procesów, które mogą orientować uwagę, na ścieżkę odgórną (ang. *top-down*) i oddolną (ang. *bottom-up*) przetwarzania (Chica i in., 2013; Hopfinger i in., 2000). Ścieżka odgórną dotyczy sytuacji, w której alokacja, a więc ukierunkowanie zasobów, odbywa się w sposób wewnętrzny (ang. *intrinsic*) i wolicjonalny (intencjonalny; ang. *voluntary*; Katsuki i Constantinidis, 2014). Uwaga odgórną określa się mianem endogennej (ang. *endogenous*; Chica i Lupiáñez, 2009). Ten rodzaj uwagi dotyczy skupienia na obiekcie zasobów związanych z obecnymi celami i intencjami osoby i określane jest mianem uwagi ukierunkowanej na cel (ang. *goal-driven attention*) lub uwagi percepcyjnej (ang. *perceptual attention*; Tanoue i Berryhill, 2012). Ścieżka oddolna wiąże się z sytuacją, w której zasoby orientowane są w sposób zewnętrzny (ang. *extrinsic*) i automatyczny (ang. *spontaneous*), tj. egzogennej (ang. *exogenous*; Katsuki i Constantinidis, 2014). W tym przypadku pewne cechy bodźca, określane mianem wyrazistych (ang. *salient*), ukierunkowują uwagę (ang. *stimulus-driven attention*).

## **1.2. Doświadczenie jako mechanizm ukierunkowujący uwagę**

Wspomniana wyżej dychotomizacja na procesy oddolne i odgórne utrzymywała się przez ostatnich kilkadziesiąt lat (Addleman i Jiang, 2019a). Niestety nie wszystkie zjawiska uwagowe mogły zostać za pomocą tego rozróżnienia wyjaśnione. Szczególnie problematyczne jest choćby empiryczne wyodrębnienie procesów czysto oddolnych lub odgórnych. Okazuje się, że obserwowane w badaniach silne tendencje selekcji uwagi często nie znajdują uzasadnienia w teoriach opartych wyłącznie na aktualnych celach czy wyrazistości prezentowanych bodźców. Jedną z ostatnich propozycji jest włączenie do modelu trzeciego czynnika wyjaśniającego zjawiska towarzyszące przetwarzaniu informacji przez człowieka – doświadczenia. Ostatnie badania dostarczają dowodów na to, że doświadczenie osoby badanej może stanowić źródło kontroli uwagi słuchowej (Addleman i Jiang, 2017; Anderson, 2016; Asutay i Vastfjall, 2016; Dyson i Alain, 2008a,b; Wagener i Hoffman, 2010; Wikman i in., 2019). Awh i in. (2012) zamiast terminu „doświadczenie” zaproponowali bliską semantycznie „historię wyboru” jako dopełniającą procesy oddolne i odgórne. Historia wyboru to zbiór informacji nabytych w ramach kumulatywnie zbieranego doświadczenia, integrujący aktualne cele i fizyczną wyrazistość bodźca. Curran i Schachter (2001) zauważyli, że zbierane doświadczenie modyfikuje specyficzne obszary mózgu wyspecjalizowane w przetwarzaniu różnych rodzajów

informacji. Co więcej, dynamika tych modyfikacji związana jest z przebiegiem uczenia – zarówno świadomego (jawnego), jak i utajonego, zwanego również mimowolnym (Mayer i in., 2006). Uczenie utajone (ang. *implicit learning*) to forma uczenia się, w której wiedza o bodźcach nabywana jest w dużej mierze bez udziału odgórnej kontroli (Coull i in., 2000; Reber, 1993). Zdobywane doświadczenie człowieka, a więc historia wyboru proponowana przez Awh i in. (2012), może być zatem traktowane jako wiedza pozyskana w wyniku uczenia się. Oba terminy – historia wyboru i uczenie – zdają się być ze sobą silnie związane.

W badaniach nad mechanizmami kierującymi uwagą często odwoływano się do terminu „historia wyboru”, by opisać uwagę uwarunkowaną doświadczeniem (Awh i in., 2012; Failing i Theeuwes, 2017). Addleman i Jiang (2019a) poszerzyli model proponowany przez Awh i in. (2012), wyodrębniając składowe doświadczenia w modalności słuchowej i proponując, by historia wyboru była jedną z nich. Nabywanie doświadczenia odbywa się za pomocą uczenia asocjacyjnego typu wskazówka-bodziec docelowy (ang. *cue-target associations*), uczenia z nagrodą (ang. *reward learning*) oraz wrażliwości na historię wyboru (ang. *sensitivity to prior selection history*). Zatem tym, co ukierunkowuje (orientuje) uwagę w przypadku modalności słuchowej, są zarówno aktualne cele, wyrazistość bodźca, jak i doświadczenie (rys. 1).



Rysunek 1: Mechanizmy ukierunkowujące uwagę [opracowanie własne na podstawie: Addleman i Jiang (2019a)]

Uczenie asocjacyjne typu wskazówka-cel dotyczy utworzenia powiązania między bodźcem kontekstualnym (ang. *contextual stimuli*), który nie pełni ważnej funkcji dla samego zadania, a cechami, które są dla tego zadania ważne (Alards-Tomalin i in., 2017; Wagener i Hoffman, 2010). Zewnętrzna wskazówka pozwala przewidywać osobie badanej, z jakiego typu celem będzie mieć do czynienia w przyszłości. Jest to więc uczenie się przywoływania zależnych od kontekstu ustawień kontroli uwagi, które w konsekwencji ma pozwolić na szybsze wykonanie zadania. Uczenie w oparciu o otrzymywane nagrody jako druga składowa doświadczenia wiąże cele z korzyściami. Cele z przypisaną wyższą nagrodą są wybierane szybciej niż te z niższą nagrodą (Asutay i Vastfjall, 2016; Wikman i in., 2019), nawet w nowych okolicznościach, gdy do obu celów nie przypisywana jest już żadna nagroda. Alokacja zasobów uwagi uprzedzona (tendencyjnie ukierunkowana) jest w stronę „bardziej opłacalnego” celu. Historia wyboru, czyli trzecia składowa doświadczenia proponowanego przez Addleman i Jiang (2019a), dotyczy sytuacji, w których uwagę ukierunkowuje prawdopodobieństwo pojawiania się istotnych własności lub cech bodźców współdzielonych w kolejnych doświadczeniach.

Wpływ historii wyboru może zawierać krótkotrwałe efekty sekwencji prób (np. prymowanie między próbami; ang. *intertrial priming*; Dyson i Alain, 2008a), jak i długotrwałe efekty wpływu mimowolnego uczenia się prawdopodobieństwa celów lub dystraktorów (Addleman i Jiang, 2019b). Powtórzenia między kolejnymi próbami prymują uwagę na dość krótko (kilka sekund). Z kolei jednym z długoterminowych wpływów historii wyboru jest uczenie się prawdopodobieństwa lokalizacji celu. Próbę weryfikacji powyższego efektu podjęto zarówno przy użyciu zadań wzrokowych (Ferrante i in., 2018; Jiang i in., 2013), jak i związanych z modalnością słuchową (Addleman i Jiang, 2019b). Osoby badane były szybsze w identyfikowaniu celów pojawiających się w lokalizacji o wysokim prawdopodobieństwie w porównaniu do lokalizacji o niskim prawdopodobieństwie. Efekt pojawiał się nawet wtedy, gdy cele w nowym bloku eksperymentalnym występowały równie prawdopodobnie we wszystkich lokalizacjach. Jak widać, podczas gdy krótkotrwałe prymowanie może przejściowo przyspieszyć selekcję i odpowiedź na wybrane bodźce podobne do tych, które zostały ostatnio wybrane, to uczenie statystyczne może obejmować bardziej trwałe mechanizmy. Mechanizmy te działają w sieciach, które realizują przesunięcie uwagi.

W propozycji Addlemana i Jiang (2019a) aktualne cele, doświadczenie oraz wyrazistość bodźca tworzą zintegrowane mapy priorytetów (ang. *priority maps*).



Koncepcja map priorytetów wiąże się nieodłącznie z dalszym rozwojem teorii uwagi. Wspomniane wyżej modele konceptualne miały charakter uniwersalny i powstały w oparciu o własności i funkcje systemu funkcjonowania człowieka. Choć nie dostarczały obliczeniowego opisu mechanizmu działania uwagi, to stanowiły i stanowią istotne podłoże do ich formułowania.

Większość ustaleń dotyczących mechanizmu uwagi pochodzi z badań nad modalnością wzrokową. Przyczyną odkryć w zakresie tej modalności jest przede wszystkim możliwość kontroli zewnętrznego kryterium uwagi człowieka – ruchów gałek ocznych, a precyzyjniej – sakad (Fu i in., 2020). Pozwala to na walidację proponowanych modeli. Inną równie ważną przyczyną badań nad wzrokiem jest wysoce adaptacyjna rola tego zmysłu dla funkcjonowania człowieka. Część teorii udało się z powodzeniem przenieść/ekstrapolować na inne modalności, co świadczy o przynajmniej częściowo wspólnym dla wszystkich zmysłów (amodalnym) charakterze uwagi. Badania w zakresie zagadnień związanych z uwagą prowadzone są jednak także dla każdej z modalności odrębnie, ponieważ mimo podobieństw, a także obszarów wspólnych, posiadają także swoją własną, wewnętrzną dynamikę (Baghdadi i in., 2021). Dla przykładu, by zlokalizować dźwięk w przypadku modalności słuchowej, orientacja uwagi nie jest potrzebna. Innymi słowy możemy rozumieć czyjaś mowę, orientując uwagę nawet w kierunku innej lokalizacji. Zwrócenie uwagi w stronę lokalizacji źródła dźwięku zwiększa jednak efektywność jego przetwarzania (Wixted i Serences, 2018). Z kolei w przypadku uwagi wzrokowej ukierunkowanie uwagi jest wymagane, by ulokować bodziec w polu widzenia celem późniejszego przetwarzania.

Kolejne rozdziały poświęcone będą przede wszystkim modalności słuchowej – z kilku względów. Po pierwsze w literaturze zaobserwować można, że słuch stanowi dopełnienie dla wzroku – szczególnie w przypadku analizy czasowej zdarzeń. O ile wzrok cechuje się wysoką rozdzielczością przestrzenną, to słuch człowieka związany jest z wysoką rozdzielczością czasową (Emberson i in., 2011). Aspekt przestrzenny w domenie słuchowej pozwala na ocenę lokalizacji zdarzeń w wymiarze 360°, co nie jest możliwe w przypadku wzroku. Choć uwaga wzbudza coraz większe zainteresowanie w środowisku badaczy słuchu (Fritz i in., 2007a; Jääskeläinen i Ahveninen, 2014; Mesgarani i Chang, 2012), nie ma zbyt długiej tradycji w opracowywaniu obliczeniowych modeli uwagi w kontekście systemów dźwiękowych. Stan wiedzy o doświadczeniu jako czynniku ukierunkowującym uwagę słuchową można uznać za szczątkowy (Addleman i Jiang,

2019a). Jednocześnie prawdą jest, że teorie uwagi słuchowej stale się rozwijają. Ostatnie propozycje modeli funkcjonowania uwagi opierające się na miarach elektrofizjologicznych pozwalają na włączenie do nich czynnika doświadczenia (Kaya i Elhilali, 2017). Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę najnowszych ustaleń związanych z naturą uwagi słuchowej.

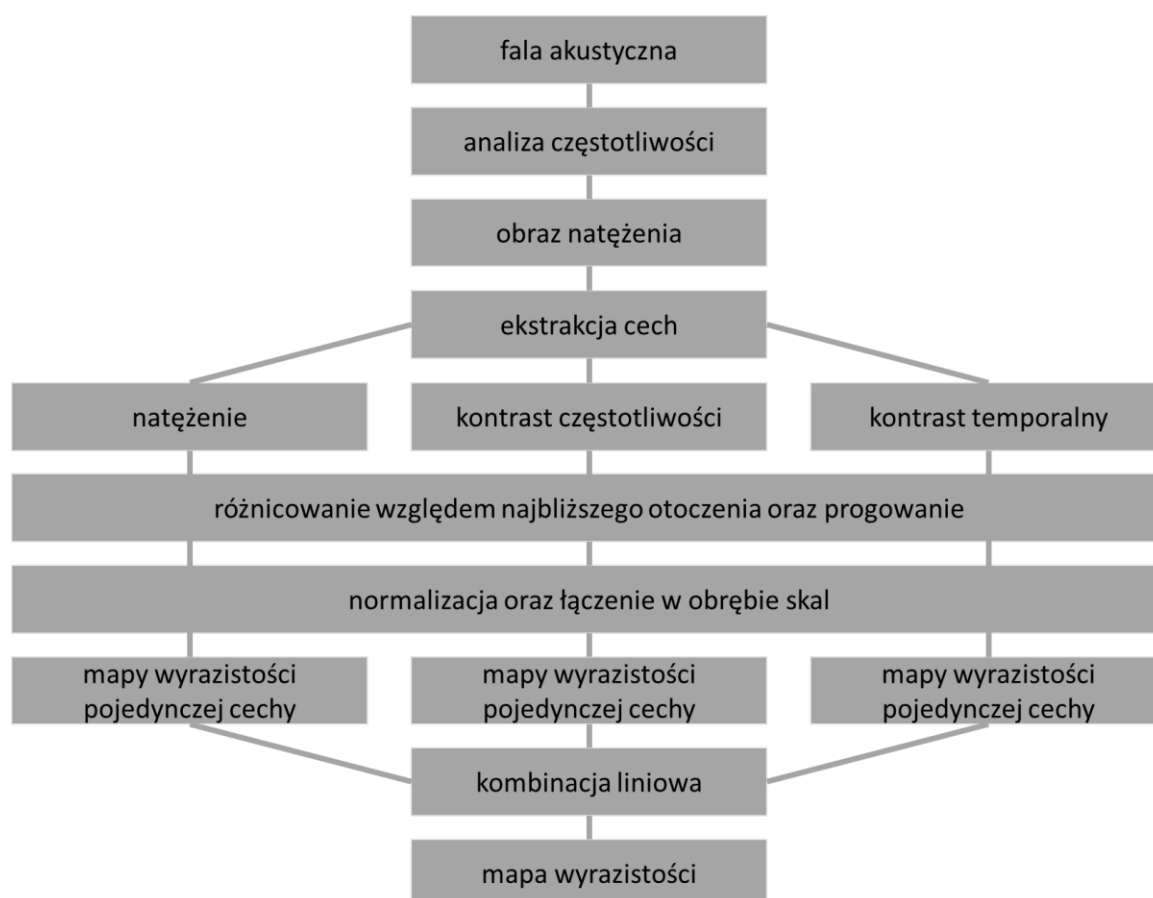
### **1.3. Współczesne modele uwagi słuchowej**

Analiza natury stale zmieniającego się środowiska akustycznego skłoniła naukowców do próby odpowiedzi na pytanie o przebieg adaptacji do jego wymagań, a także weryfikacji sposobu przetwarzania w systemie słuchowym. Pierwotna propozycja zakładająca statyczne przetwarzanie w korze czuciowej została wyparta przez propozycję aktywnego i plastycznego mapowania, która to została poparta odkryciami fizjologicznymi (Shamma i Fritz, 2014). Zgodnie z nimi doświadczenia słuchowe mogą cechować się zarówno lokalnym, jak i globalnym wpływem. Lokalnym za sprawą zmiany właściwości pól receptywnych, globalnym – przez zmianę w ramach obwodów korowych (Fritz i in., 2007b; Weinberger, 2001). Innymi słowy, badania dostarczają konkluzji, że modulacja uwagi odbywa się w całej korze słuchowej – zarówno na poziomie procesów oddolnych, odgórnych, jak i czynnika doświadczenia.

#### **1.3.1. Modele *bottom-up* uwagi słuchowej**

Pierwsze zaawansowane teorie uwagi słuchowej powstawały w oparciu o ustalenia dotyczące modalności wzrokowej (Kaya i Elhilali, 2014). Głównym celem było przedstawienie mechanizmu systemu kontroli uwagi w oparciu o mapy wyrazistości (Borji i in., 2013). Mapy wyrazistości reprezentują system odpowiedzi układu neuronalnego na specyficzne (konkretne) cechy bodźca. Pierwszą propozycję map wyrazistości dla uwagi słuchowej zaproponował Kayser i in. (2005). Głównym celem była możliwość przewidzenia, która pozycja sceny przyciągnie uwagę jako pierwsza. W słuchowym modelu wyrazistości cel polega na odkryciu, która część fali dźwiękowej jest najbardziej atrakcyjna w oparciu o oddolny system priorytetów. Tym sposobem pewna charakterystyka dźwięku, który przyciąga uwagę, jest obliczona ilościowo. Fala dźwiękowa jest transformowana w czasowo-częstotliwościowy obraz dla dalszej analizy (rys. 2). Zaplecze proponowanego modelu było oparte na wizualnym modelu wyrazistości, w którym wszystkie cechy są skalowane, by wygenerować mapę, która poddawana jest normalizacji w celu wyróżnienia wyraźnych szczytów. Następnie integrowane zostają pewne cechy,

tj. intensywność dźwięku, częstotliwość, kontrast temporalny. Są one zintegrowane jako mapa wyrazistości, która wskazuje wielkość „atrakcyjności” różnych części fali dźwiękowej. Model Kaysera (2005), choć operuje na stosunkowo prostych cechach, jest w stanie wiarygodnie dopasować reakcje behawioralne w zadaniach polegających na wykrywaniu dźwięków o dużym znaczeniu. Okazało się również, że przetwarzanie wyrazistych bodźców w mózgu może przebiegać podobnie dla różnych modalności sensorycznych.



Rysunek 2. Mapa wyrazistości dla uwagi słuchowej. Schemat należy odczytywać od góry ku dołowi [opracowanie własne na podstawie: Kayser i in. (2005)]

Na podstawie pracy Kaysera (2005) stworzono wiele bardziej skomplikowanych analiz cech słuchowych. Kalinli i Narayanan (2007) włączyli do zestawu cech wysokość i orientację w czasie i wprowadzili poprawiony sposób obliczania kontrastów. Następnie badania zaczęły zmierzać w stronę uzasadniania biologicznego (wiarygodności biologicznej; ang. *biological plausability*). Cechy spektrotymoralne symulują w nich

neuralne reakcje zachodzące w korze słuchowej (Duangudom i Anderson, 2007). Powyższe modele nie uwzględniały jednak zasadniczej różnicy między słuchem a wzrokiem – natury dźwięku jako ewoluującego w czasie. W jednym z modeli Kaya i Elhilali (2012) obliczyli mapę wyrazistości czasowej, podobnie jak Kayser (2005), jednak wszystkie cechy traktowano jako zmieniające się w czasie. Co więcej, Tsuchida i Cottrell (2012) zaproponowali wykorzystanie w modelach uwagi szerokiego spektrum statystyk celem dynamicznego aktualizowania map wyrazistości. Połączyli oni długotrwałe statystyki z lokalnymi (szybko zmieniającymi się), czego rezultatem była możliwość wyrażenia stopnia wyrazistości bodźców za pomocą rachunku probabilistycznego. Dźwięk wyrazisty stał się dźwiękiem zaskakującym (ang. *surprising*) w stosunku do wyuczonych statystyk. Zaletą modelu była ponadto kontrola wydajności obliczeniowej uwzględnianych cech za pomocą kochleogramu.

Opisane w powyższym akapicie modele uwagi słuchowej opierały się na procesach zidentyfikowanych i opisanych dla dziedziny wizualnej, co ogranicza ich możliwości deskrypcyjne i eksplanacyjne w domenie słuchu. Spowodowało to skupienie większych wysiłków wokół czerpania inspiracji ze znanych mechanizmów słuchowych w celu opracowania lepiej dopasowanych modeli. Pierwszy model, który nie opierał się na wiedzy dotyczącej wzroku, lecz słuchu, zaproponowany został przez Kaya i Elhilali (2014). Wykorzystano w nim kodowanie predykcyjne i teorię uprzedzeń jako możliwe mechanizmy determinujące wyrazistość słuchową w reakcji mózgu na dźwięk. Podejście to kładzie duży nacisk na rolę przetwarzania zdarzeń w czasie i kształtowania odpowiedzi neuronalnych na bieżące dźwięki w oparciu o ich wcześniejszy kontekst. Fala akustyczna jest mapowana na wielowymiarową przestrzeń słuchową kodującą percepcyjną głośność, wysokość i barwę dźwięku, bazując na ewoluujących w czasie cechach (Kaya i Elhilali, 2012). W ramach modelu proponowane jest, że statystyki na temat cech pojawiających się dźwięków zbierane są w czasie, co pozwala na przewidywanie przyszłych sygnałów sensorycznych. Waga przypisywana poszczególnym cechom jest zatem zmienna, co oznacza, że integracja informacji jest dynamiczna i interakcyjna (nieliniowa). Model odrzuca zatem koncepcję niezależności cech słuchowych w kierowaniu percepcją na rzecz ich wzajemnej konwolucji. Można więc uznać go za pierwszą próbę uwzględniania w modelu uwagi słuchowej także wcześniejszych doświadczeń osoby rozumianych jako wyuczenie pewnych regularności i statystyk (Addleman i Jiang, 2019a).

### 1.3.2. Modele top-down uwagi słuchowej

Modele odgórnie ukierunkowanej uwagi słuchowej opierają się przede wszystkim na nurcie badań związanych z neuronalnymi podstawami uwagi zależnej od zadania (Kaya i Elhilali, 2017). Badania na zwierzętach wykazały, że zmiana celów behawioralnych generuje neuronalną adaptację i szybką plastyczność celem wzmocnienia odpowiedzi (David i in., 2012; Fritz i in., 2007c; Yin i in., 2014). Populacja neuronów odpowiedzialnych za przetwarzanie informacji w określonym wymiarze zwiększa kontrast między celem a tłem, ułatwiając w ten sposób skupienie uwagi na specyficznych zdarzeniach dźwiękowych (Shamma i Fritz, 2014). Proces ten jest szybki, indukowany uwagą oraz zależny od struktury zadania i nagrody. Obejmuje zarówno pierwotne, jak i wyższe obszary słuchowe (Atiani i in., 2014). Wyniki badań z wykorzystaniem funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (fMRI) i EEG potwierdziły stymulowany uwagą wzrost aktywności neuronalnej w korze słuchowej u ludzi (Alain i Woods, 1997; Petkov i in., 2004). Zaobserwowano również efekty neuronalne ujawniające rozproszoną aktywność wywołaną przez przestrzenne i nieprzestrzenne formy uwagi słuchowej (Hill i Miller, 2010; Lee i in., 2013, 2014). Różne rodzaje uwagi, zwłaszcza uwaga oparta na cechach i uwaga oparta na obiektach, wydają się wywoływać różną aktywację w takich obszarach, jak skojarzeniowy obszar słuchowy (*planum temporale*) i różne regiony górnego zakrętu skroniowego (*superior temporal gyrus*; Ahveninen, 2006; Zatorre i in., 1999). W nawiązaniu do wyników uzyskanych w modelach zwierzęcych, ostatnie postępy w metodach obliczeniowych pozwoliły na analizę zapisów neuronalnych u ludzi przy użyciu magnetoencefalografii (MEG) i elektrod powierzchniowych. Ujawniły one większą aktywność neuronalną w reakcji na dźwięki, na które zwracano uwagę, w porównaniu z dźwiękami, na które nie zwracano uwagi (Ding i Simon, 2012; Mesgarani i Chang, 2012). Idąc dalej, opracowywane są obecnie narzędzia matematyczne pozwalające na oszacowanie pól receptywnych na podstawie zapisów MEG i EEG, co stanowi obiecującą podstawę do ujednoczenia wyników uzyskanych w różnych paradygmatach w celu pełnego opisu przetwarzania selektywnej uwagi w mózgu (Jääskeläinen i Ahveninen, 2014).

Pomimo rosnącej liczby prac potwierdzających, że odpowiedzi w korze słuchowej są modulowane przez uwagę, przekładanie tej wiedzy na modele obliczeniowe jest powolne. Jedną z dróg w modelowaniu stanowi wyraźne scharakteryzowanie mechanizmu adaptacyjnego uwagi. Mesgarani i in. (2010) postawili hipotezę, że punktowe światło

uwagi działa w celu zwiększenia separacji pomiędzy istotnymi dla zadania celami a dystraktorami. W związku z tym optymalną sytuacją jest możliwie jak największa dyskryminacja pomiędzy odpowiedziami neuronów na cel i dystraktor, co daje w rezultacie możliwość wzmocnienia określonych fizycznych cech wejścia słuchowego. Na przykład podczas poszukiwania dziecka w sklepie wzmocnione zostaną wyższe dźwięki, a koszt optymalizacji będzie zwiększony dla barwy dźwięku oddającej prawdopodobny płacz. Model ten dostarcza silnego wyjaśnienia efektów uwagi na poziomie pojedynczych neuronów i jest silnie rozbudowywany. Carlin i Elhilali (2015) zauważyli, że mowa rozumiana jako zbiór dźwięków wymaga reagowania na jej abstrakcyjne reprezentacje, czego nie rozwiązywała propozycja Mesgarani i in. (2010). Zaproponowali więc, by do modelu włączyć możliwość selekcji uwagi w oparciu o strukturę zadania, co pozwoliło na kontrolę struktur bardziej złożonych niż tylko podstawowe własności dźwięków. Kalinli i Narayanan (2007, 2008) wykorzystali sieć neuronową do automatycznego uczenia się optymalnych przyrostów uwagi dla konkretnych zadań, takich jak klasyfikacja sceny akustycznej. Wreszcie w jednym z najnowszych modeli Patil i Elhilali (2013) postawili hipotezę, że uwagę można rozumieć jako priorytety w bayesowskiej reprezentacji informacji pochodzących z poszczególnych zmysłów (Shi i in., 2013; Whiteley i Sahani, 2012). Model ten wykorzystuje dwuetapowe ramy obliczeniowe do rozpoznawania scen akustycznych: etap ekstrakcji cech oraz etap mapowania obiektów. Pierwszy z nich odwzorowuje przetwarzanie w ścieżce słuchowej od ślimaka do pierwotnej kory słuchowej, natomiast drugi wykonuje klasyfikację cech do typów scen. Uwaga odgórna działa w celu optymalizacji zadania zarówno na poziomie cech – stosując wzmocnienie na filtrach ekstrahujących je, a także na poziomie obiektów – dostosowując parametry klasyfikatora sceny.

### ***1.3.3. Integracja modeli uwagi słuchowej***

Naukowcy zmierzają do ujednoczenia modeli uwagi selektywnej poprzez integrację podejść oddolnych i odgórnych. W ich świetle głównym aspektem map wyrazistości jest przewidywanie najważniejszych aspektów dźwięku w oparciu o priorytety uwagi oddolnej i odgórnej. Mapa wyrazistości powstała dla uwagi oddolnej jest integrowana z mapami, które są wynikiem procesów odgórnych. Rola systemu odgórnego może być dodana do modelu poprzez ważenie cech oddolnie zanim dojdzie do integracji map (Navalpakkam i Itti, 2005). By rozszerzyć mapy wyrazistości o procesy odgórne, w pierwszej kolejności tworzona jest mapa w oparciu o predefiniowane cele

(Frintrop, 2006). Zwiększają one wrażliwość procesów odgórnych na bodźce związane z celem w porównaniu do innych dźwięków (np. dystraktorów). Predefiniowane cele nie mogą jednak zatrzymać procedury procesów oddolnych, więc nadawanie wag wartościom poszczególnych cech odbywa się po ich wydobyciu. Wtedy to wszystkie mapy są integrowane, by stworzyć ogólną mapę wyrazistości. Pokazuje ona najbardziej atrakcyjne punkty sceny akustycznej z uwzględnieniem zarówno procesów oddolnych, jak i odgórnych.

W ramach modeli uwagi słuchowej aktualnie proponuje się uwzględnianie nie tylko własności bodźca, czynników związanych z czasem pojawienia się i lokalizacją bodźca, celem i intencjami osoby, ale także jej doświadczeniem (Addleman i Jiang, 2019a; Awh i in., 2012; Chelazzi i in., 2014; Ferrante i in., 2018). Uwaga słuchowa w powyższej propozycji działa jak proces lub procesy selekcji, które koncentrują zasoby sensoryczne i poznawcze na najbardziej istotnych zdarzeniach w przestrzeni dźwiękowej, przy czym istotność jest podyktowana przez sam bodziec, przez zadanie do wykonania lub wynik z zebranego wcześniej doświadczenia. Doświadczeniem może być wyuczona mimowolnie wiedza na temat częstości pojawiania się dźwięków w określonym interwale lub kolejności występowania następujących po sobie dźwięków. Historia dokonywanych wyborów może zatem być integrowana w mapy priorytetów – podobnie jak wyrazistość czy procesy odgórne. Addleman i Jiang (2019a) zaznaczają, że niektóre wcześniejsze modele uwagi rozważały rolę doświadczeń w uwadze słuchowej. W ich świetle bayesowskie prawdopodobieństwa a priori są obliczane w oparciu o poprzednie bodźce słuchowe, by determinować, czy któreś aktualne cechy są nieoczekiwane i przez to bardziej wyraźne (Kaya i Elhilali, 2014; Tsuchida i Cottrell, 2012; Yu i Dayan, 2005a, 2005b). Choć modele te wciąż opierały się na dychotomii procesów oddolnych i odgórnych, to kumulatywnie zbierane doświadczenie w świetle propozycji Awh i in. (2012) oraz Addlemana i Jiang (2019a) można kwalifikować jako historię wyboru.

Powyższe modele, stanowiąc prekursorskie próby weryfikacji wpływu ekspozycji na percepcję wyrazistości bodźca, nie objęły składowych doświadczenia w propozycji Addlemana i Jiang (2019a). Składowe te pozwalają precyzować specyfikę wpływu doświadczenia na kształtowanie się priorytetów uwagi słuchowej. Co więcej, doświadczenie może wpływać na uwagę w sposób zarówno nieświadomy (uczenie mimowolne), jak i prowadzić do uświadomienia sobie pewnych aspektów doświadczenia osoby (uczenie jawne), które skutkuje przesunięciem uwagi ukierunkowanym na cel.

Te dwie ścieżki nie wykluczają się, tj. nieuświadomiona tendencyjność może powstawać początkowo, by później uczestnicy badania uświadomili sobie pewne aspekty struktury zadania. Procesy ukierunkowania uwagi doświadczeniem i zadaniem mogą działać równolegle. Addleman i Jiang (2019a) sugerują, że pewne rodzaje doświadczenia są bardziej prawdopodobne do świadomego rozpoznania niż inne. Dowody wspierające hipotezę o nieuświadomionym ukierunkowaniu uwagi będącym wynikiem zebranego w ramach mimowolnego uczenia się doświadczenia zostały do tej pory przedstawione dla uczenia asocjacyjnego między wskazówką a celem oraz dla historii wyboru (Addleman i Jiang, 2019b; Asutay i Västfjäll, 2016).

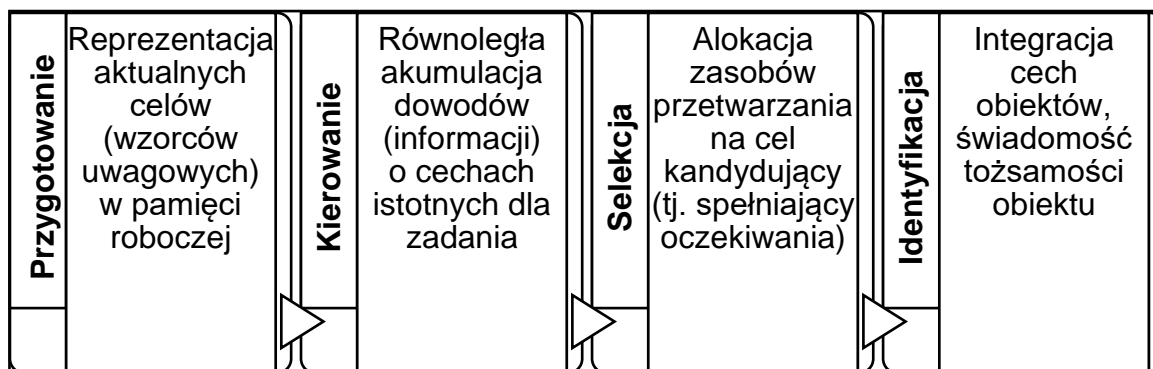
Mapy priorytetów proponowane przez współczesne nurty badań uwagi słuchowej stanowią przestrzeń dla weryfikacji wielu hipotez. Jednocześnie oferują możliwość uwzględniania trzech głównych mechanizmów ukierunkowujących uwagę: oddolnych, odgórných oraz doświadczenia. Proces uwagi jest dynamiczny i zmienny w czasie, stąd różna waga powyższych mechanizmów dla kolejnych etapów jej przetwarzania. W dalszej części rozdziału omówione zostaną etapy procesu uwagowego wraz z analizą czynników mających wpływ na przetwarzanie uwagi.

#### **1.4. Etapy procesu uwagowego**

##### **1.4.1. Czteroetapowy model uwagi Eimera**

Od czasu Posnera (1980), który zaproponował istnienie trzech elementarnych systemów uwagowych: aktywacyjnego, orientacyjnego oraz zarządczego, powstało szereg propozycji, z których jedną z najbardziej popularnych stanowi czteroetapowy model uwagi wzrokowej (Eimer, 2014). Eimer (2014) wyodrębnia cztery etapy uwagi: przygotowanie (ang. *preparation*), kierowanie (ang. *guidance*), selekcję (ang. *selection*) i identyfikację (ang. *identification*) (rys. 3). Schröger i in. (2015) zauważają, że proponowany model może być z powodzeniem przełożony na modalność słuchową, ponieważ uwaga rozumiana jest jako wynik skoordynowanego działania zestawu mechanizmów neurokognitywnych.





Rysunek 3. Czteroetapowy model uwagi [opracowanie własne na podstawie: Eimer (2014)]

Przygotowanie wiąże się z istniejącymi w pamięci roboczej reprezentacjami aktualnych celów. Jest to obecnie istniejąca mapa wzorców, które pozwalają osobie mieć jakieś oczekiwania co do przetwarzania przyszłych obiektów. To przygotowanie aprioryczne determinuje kolejne etapy procesu przeszukiwania. Drugim krokiem jest kierowanie, które czasowo występuje już w momencie prezentacji bodźca, a wiąże się bezpośrednio z dowodami o cechach istotnych dla zadania. Dla przykładu, jeśli osoba poszukuje kobiecego głosu w tle osób rozmawiających, to wyostrza te cechy, które są istotne dla kobiecego głosu, hamując pozostałe – typowe dla głosów np. męskich. Kierowanie uwagą oparte na cechach związane jest z obecnością własności definiujących cel – pozyskane informacje mogą być wykorzystane do wyboru obiektów docelowych. Pozwala to w konsekwencji na efektywne alokowanie zasobów przetwarzania na cele kandydujące do spełnienia oczekiwań (czyli w stronę tego typu lokalizacji). Etap ten nazywany jest selekcją. W wielu modelach uwagi wyodrębnia się także następujący po etapie selekcji etap identyfikacji, w którym cechy tych obiektów są integrowane, a tożsamość obiektu staje się dostępna dla świadomości i kontroli działania (Wolfe i Gray, 2007; Xu i Chun, 2009). Niezależność selekcji i identyfikacji jest podkreślana przez ich wrażliwość na różne czynniki. Efektywność selekcji zależy od podobieństwa między bodźcami docelowymi a konkurującymi z nimi dystraktorami (Duncan i Humphreys, 1989). Z kolei efektywność identyfikacji zależy od złożoności obiektów docelowych (Franconeri, 2013; Xu i Chun, 2009).

## **1.4.2. Czynniki wpływające na proces przetwarzania**

### **1.4.2.1. Rola zadania.**

Töllner i in. (2012) zwracają uwagę, że ważność (rola) kolejnych etapów przetwarzania jest uzależniona od rodzaju zadania (i ważności bodźca). Swoje uwagi opierają o wnioski płynące z paradygmatów związanych z kierowanym wyszukiwaniem (ang. *guided search*). Scena rejestrowana jest w nich dzięki zestawowi zorganizowanych map cech, na podstawie których obliczana jest obecność kontrastu cech dla wszystkich lokalizacji w całym polu. Sygnały kontrastu cech są następnie łączone (sumowane) w mapach specyficznych dla danego wymiaru, po czym są integrowane przez ogólną mapę wyrazistości lub główną mapę aktywacji. Zakłada się, że krajobraz aktywacji na tej mapie kieruje uwagę na najbardziej aktywnym miejscu (na mapie), które jest określane w konkurencyjnym procesie „zwycięzca bierze wszystko”. Co istotne, w tych modelach aktywna jednostka mapy głównej wskazuje tylko, że w miejscu, które reprezentuje, istnieje różnica cech w stosunku do miejsc sąsiednich, ale nie podaje dokładnego wymiaru lub cechy, która powoduje tę różnicę. W związku z tym aktywność na poziomie mapy głównej kierującej uwagę jest wystarczająca do wskazania obecności (lub braku) lub określonej lokalizacji (np. po lewej lub prawej stronie) pojedynczej cechy celu, a sygnał celu może być przekazywany bezpośrednio do etapów selekcji i produkcji odpowiedzi (jak w zadaniach lokalizacji i detekcji). Warunki eksperymentalne mogą zatem generować różnice pod względem przebiegu czasowego poszczególnych wewnętrznych etapów przetwarzania. Oznacza to, że współczesne modele uwagi opierające się na czasach reakcji, jak teoria integracji cech (ang. *feature-integration theory*) (Treisman i Gelade, 1980), model poszukiwania kierowanego (ang. *guided-search model*) (Wolfe, 1994) i rachunek ważenia wymiarów (ang. *dimension-weighting account*) (Müller i in., 2010) są mocno ograniczone co do możliwości jednoznacznego przypisania obserwowanych efektów czasowych konkretnym podetapom przetwarzania. Zróznicowanie w zakresie przetwarzania poszczególnych etapów uwagi może zostać jednak niezauważone z powodu ryzyka równoważnych opóźnień w tradycyjnych miarach czasu reakcji. Jak wykazało badanie zespołu Töllner i in., 2008, metoda EEG może pozwolić na kontrolę czasowego przebiegu procesu uwagowego, a tym samym dostarczyć bardziej rzetelnych danych dla toczących się dyskusji na temat pochodzenia efektów ogólnych (Müller i in., 2003; Theeuwes i in., 2006), oddolnych (Feintuch i Cohen, 2002; Krummenacher i in., 2002) oraz związanych z doświadczeniem (Found i Müller, 1996; Mortier i in., 2005).

Odkrycie zespołu Töllner i in. (2012) niesie ze sobą poważne implikacje – wydajność, a przede wszystkim udział zasobów przetwarzania może być zróżnicowany w zależności od rodzaju zadania. Przykładem mogą być zadania wykrywania i lokalizacji, w przypadku których wystarczy wiedzieć, czy lub gdzie cel pojawił się na ekranie. Informacje te można uzyskać bez konieczności wyraźnego uświadomienia dokładnej tożsamości cech fizycznych celu. Pod tym względem zadania wykrywania i lokalizacji różnią się zasadniczo od grupy zadań identyfikacji, w których uczestnicy muszą wyodrębnić wcześniej określony atrybut celu lub zestaw atrybutów celu, aby wybrać właściwą reakcję motoryczną. Töllner i in. (2012) proponują, że zadania identyfikacyjne można klasyfikować według: (1) głębokości przetwarzania postselektywnego niezbędnego do podjęcia decyzji o odpowiedniej reakcji motorycznej oraz (2) powiązania między atrybutami określającymi cel i reakcję. Głębokość przetwarzania dotyczy analizy percepcyjnej wybranego przez uwagę bodźca. Analiza jest zróżnicowana ze względu na typ zadania (Found i Müller, 1996; Maljkovic i Nakayama, 1994). Przykładem jest analiza percepcyjna związana z tożsamością wymiarową (np. zadanie dotyczy wysokości dźwięku) lub tożsamością cechową (np. zadanie dotyczy konkretnego dźwięku o określonej wysokości). Drugie kryterium, czyli powiązanie między celem i reakcją, może dotyczyć zarówno sytuacji rozdzielenia obu (Pollmann i in., 2006), jak i ich wzajemnego powiązania (jak w zadaniu dyskryminacji; Gramann i in., 2010).

#### **1.4.2.2. Rola kontekstu: typ sceny akustycznej**

Wnioski płynące z pracy Töllnera i in. (2012) skutkują jeszcze jedną konsekwencją. Samo środowisko, z którym ma do czynienia osoba, także może wiązać się z różnymi sposobami przetwarzania orientacji uwagi. Jedną z klasycznych dychotomii w zakresie modalności słuchowej jest typ sceny akustycznej, z którą ma do czynienia osoba badana. Zasadniczo wyodrębnić można sytuację, w której obecne jest tylko jedno źródło dźwięku, a także drugą – w której występuje szereg dźwięków konkurujących ze sobą w jednostce czasu. Pierwszy typ sceny określić można mianem prostej sceny akustycznej, a drugi – złożonej sceny akustycznej.

Różne zaangażowanie poszczególnych procesów uwagowych w przetwarzanie obu scen zostało podkreślone w badaniu Lewalda i Getzmana (2015). Przede wszystkim w przypadku prostej sceny akustycznej zaobserwować można pominięcie etapu selekcji związanego z odseparowaniem dystraktorów, szumu od celu. Z kolei dla złożonej sceny akustycznej osoba dokonuje selekcji bodźców, by zorientować uwagę na celu.

W przypadku prostej sceny akustycznej uwaga oddolnie ukierunkowana jest na jedyne źródło dźwięku. Nie zmienia to jednak faktu, że nawet w sytuacji prostej sceny akustycznej uwaga może być w sposób odgórny ukierunkowana celami związanymi z zadaniem lub wcześniej wyuczonymi prawidłowościami. W przypadku sceny złożonej proces może odbyć się zarówno w sposób oddolny (cel jest bodźcem wyrazistym na tle dystraktorów), jak i odgórny (cel jest bodźcem o podobnych parametrach do dystraktorów, jednak zostaje wyznaczony przez zadanie jako cel). W porównaniu z lokalizacją pojedynczego źródła dźwięku w ciszy, sytuacja złożonej sceny akustycznej jest bardziej angażująca dla systemu słuchowego. Wydobycie i lokalizacja celu pomiędzy wieloma innymi dźwiękami wymaga, w dodatku do rzeczywistej analizy przestrzennej, symultanicznej analizy szeregu różnych cech akustycznych, jak wysokość i barwa. Co więcej, zwiększony wysiłek uwagi jest potrzebny do skupienia się na bodźcu docelowym, bo jednocześnie trzeba także hamować konkurencyjne źródła informacji słuchowej.

Powyższe zróżnicowanie etapów uwagi, sposobów jej ukierunkowania, a także specyfika środowiska, z którym ma do czynienia w danym momencie osoba pozwalają przypuszczać, że przynajmniej częściowo różne sieci neuronalne dedykowane są poszczególnym wariantom przetwarzania uwagi (Bendixen, 2014; Sohoglu i Chait, 2016). W następnym podrozdziale zaprezentowane zostaną klasyczne sposoby walidacji uwagi słuchowej, a także towarzyszące im wnioski natury neuropoznawczej – w szczególności korelaty behawioralne i neuronalne tego złożonego procesu.

## **1.5. Walidacja modeli oraz biologiczne podłoże uwagi słuchowej**

### ***1.5.1. Metody pomiaru uwagi***

Standardowo wyodrębnia się dwie metody pomiaru – subiektywne (np. samoopis) i obiektywne, które możemy podzielić na behawioralne (np. czas wykonania zadania, poprawność) i neurofizjologiczne (np. EEG, fMRI). Niestety, jak dotąd nie ma zgody co do najlepszego sposobu badania wpływu uwagi na percepcję słuchową, niezależnie od tego, czy jest ona ukierunkowana na zadanie, czy oparta wyłącznie na wyrazistości. Podczas gdy dane z rejestracji ruchu gałek ocznych dostarczają obiektywnych metryk oceny dla uwagi wzrokowej, modele uwagi słuchowej nie posiadają jasnych, precyzyjnych wskaźników istotności. Większość modeli uwagi wykorzystuje własne dane walidacyjne i metryki, począwszy od aktywności pojedynczych neuronów, poprzez reakcje ludzi, aż po

starannie dobrane zdarzenia lub sceny dźwiękowe, w których biorą udział uczestnicy lub które są dla nich istotne.

W pierwszych modelach wyrazistości słuchowej eksperymenty behawioralne stosowano jedynie w celu zilustrowania, że model może wykryć obiektywnie istotne zdarzenia. W badaniach tych osoby wybierały bardziej znaczącą z dwóch prezentowanych scen (Duangudom i Anderson, 2007; Itti i in., 1998; Tsuchida i Cottrell, 2012), a jako zdarzenia znaczące wykorzystywano różne naturalne dźwięki otoczenia. Późniejsze modele zaadaptowały bardziej zaawansowane paradygmaty, w których tło miało przewidywalną strukturę, a zadanie polegało na wykryciu istotnego zdarzenia, które odbiegało od przewidywalnego wzorca (Kaya i Elhilali, 2014; Tordini i in., 2013). Przykładem może być dźwięk gitary wydobyty podczas utworu, który do tej pory związany był wyłącznie z grą na skrzypcach. Aktualnie podejmowane są także próby wykorzystania naturalnych strumieni dźwiękowych do badania percepcji wyrazistości słuchowej. Osoby badane słuchają prawdziwych nagrań i zaznaczają za pomocą interfejsu te momenty, które uważają za istotne lub interesujące (Kaya i Elhilali, 2017). Opisane powyżej metody słuchowe, w przeciwieństwie do dziedziny wizualnej, w której automatyczne sakady mogą być szybko rejestrowane dla wielu scen, są znacznie wolniejsze i mniej efektywne. Trwają próby rozwiązania tego problemu z wykorzystaniem zapisów pojedynczych neuronów w czasie rzeczywistym celem prześledzenia procesu uwagowego (Fu i in., 2020, Kaya i Elhilali, 2017). Metoda ta ze względu na inwazyjny charakter oferuje bezpośredni dostęp do informacji o wpływie uwagi na aktywność neuronalną w systemie słuchowym jedynie u zwierząt, w tym kotów, małp i fretok (Elhilali i in., 2013). Mimo interesujących wniosków dotyczących neuronalnych korelatów uwagi słuchowej, możliwość uogólniania zdobytych informacji na temat skomplikowanych sieci korowych zaangażowanych w percepcję słuchową jest mocno ograniczona. Najbliższym korelatem zapisu pojedynczych neuronów u ludzi jest elektrokortykografia (ECoG; Kaya i Elhilali, 2017). Jest to jednak technika wysoce inwazyjna i stosowana tylko u pacjentów neurochirurgicznych. Wykorzystuje siatki elektrod umieszczone na odsłoniętym mózgu w celu zbadania modulacji aktywności kory mózgowej za pomocą bogatych i złożonych bodźców.

Magnetoencefalografia (MEG), elektroencefalografia (EEG) oraz funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI) stanowią nieinwazyjne alternatywy dla badań opisywanych powyżej. Mogą być one szeroko stosowane w bardziej ogólnej (niż pacjenci

neurochirurgiczni) populacji. Choć nie posiadają takiej rozdzielczości przestrzennej jak ECoG i są bardziej podatne na artefakty, to umożliwiają bezpośredni wgląd w procesy neuronalne bez konieczności podejmowania jednoznacznych decyzji percepcyjnych. Obecne techniki analityczne pozwalają coraz lepiej eliminować szum i zachować informacje neuronalne o stanach uwagi i stanach percepcyjnych osób badanych (Cichy i Teng, 2017). Możliwość obserwacji przestrzennego i czasowego wymiaru funkcjonowania mózgu i połączeń między jego poszczególnymi obszarami spowodowała, że większa część ustaleń dotyczących funkcjonowania uwagi słuchowej człowieka pochodzi z badań MEG, EEG oraz fMRI. Dzięki nim wiadomo, że uwaga jako funkcja poznawcza ukształtowana jest przez interakcję aktywacji poszczególnych regionów mózgu, połączeń między nimi, a także neurotransmiterów pośredniczących i umożliwiających sprawny przebieg procesu.

### **1.5.2. Biologiczne podłoże mechanizmów kierujących uwagą**

Każda część mózgu w obszarach pierwszorzędowej kory sensorycznej jest odpowiedzialna za kodowanie modalności sensorycznej. Analiza badań wykorzystujących neuroobrazowanie funkcjonalne pokazuje, że zwrócenie uwagi na bodziec o określonej modalności powoduje zwiększenie aktywności adekwatnej kory (która jest odpowiedzialna za kodowanie tej modalności; Price i Moncrieff, 2021). Regiony te odpowiedzialne są za procesy oddolne, co oznacza, że ich aktywność wpływa na orientację uwagi oddolnej. Procesy odgórne mogą jednak modulować aktywność tej pierwszorzędowej kory sensorycznej (ang. *primary sensory cortex*). Stąd też zasoby sensoryczne, jak i procesy odgórne są zaangażowane w system kontroli uwagowej. Słuchowa uwaga oddolna znajduje się w obszarach skroniowych (ang. *temporal regions*). Są one aktywne także wtedy, gdy osoba oczekuje nadchodzącego bodźca sensorycznego (Veldhuizen i Small, 2011). Każdy z tych regionów jest aktywny podczas obecności istotnego (wyraźnego) bodźca. Regiony ułożone są w sposób hierarchiczny, tak że na każdym kolejnym poziomie przetwarzania neuronalnego regiony z wyższych poziomów mogą wpływać na regiony niższego poziomu. Wpływ ten przejawia się hamowaniem odpowiedzi na dystraktory i przyspieszaniem odpowiedzi na cele (Baghdadi i in., 2021).

Przetwarzanie regionów wyższego poziomu kształtuje uwagę odgórną. Centralną częścią mózgu zaangażowaną w uwagę odgórną jest płat czołowy. Obszary płata czołowego są jednak różnie dystrybuowane – najczęściej w oparciu o zróżnicowanie

będące wynikiem specyfiki aktualnych zadań. Niezależnie od tego, czy aktualne cele osoby wynikają z doświadczenia, czy z instrukcji zadania, wygląda na to, że w przypadku obu zaangażowany jest podobny mechanizm neuronalny angażujący połączenia czołowo-ciemieniowe (ang. *frontoparietal*), który zawiera górną część kory przedczołowej (ang. *superior prefrontal cortex*) i tylną korę ciemienną (ang. *posterior parietal cortex*; Addleman i Jiang, 2019a). Neuronalny mechanizm nieświadomego przesunięcia uwagi ukierunkowanej doświadczeniem jest znacznie mniej zrozumiany. Kwestią wartą zweryfikowania pozostaje zatem pytanie, czy proces ten wspierany jest przez te same czołowo-ciemienniowe (ang. *frontoparietal*) obszary, jak w przypadku uwagi ukierunkowanej celem zadania.

O ile wnioski płynące z badań z użyciem rezonansu magnetycznego pozwalają nakreślić przestrzenną (lokalizacyjną) charakterystykę procesów oddolnych, odgórnych oraz doświadczenia, to badania z zakresu elektrofizjologii pomagają określić przebieg czasowy procesów zachodzących w poszczególnych obszarach mózgu na różnych etapach procesu uwagowego. Chociaż teorie uwagi dostarczają ram analitycznych, a badania anatomiczne identyfikują kluczowe struktury neurologiczne zaangażowane w procesy uwagi, pozostaje pytanie, gdzie i kiedy w systemie słuchowym uwaga zaczyna wpływać na kodowanie i późniejsze przetwarzanie danych sensorycznych. Niektórzy badacze zgłębiali potencjalną rolę uwagi już na poziomie wczesnego przetwarzania w pniu mózgu (Forte i in., 2017; Picton i Hillyard, 1974; Varghese i in., 2015). Większość badań koncentruje się jednak na roli kory słuchowej w selektywnej uwadze (Hillyard i Kutas, 1983; Näätänen, 1975; Picton i Hillyard, 1974), ponieważ uważa się, że regiony korowe integrują oddolne informacje o bodźcu z odgórnymi wpływami związanymi z istotnością informacji dla zadania (Starr i Golob, 2006). Poniżej przedstawiono wyniki badań dotyczących efektów uwagi na poziomie kory słuchowej – w szczególności czasowy aspekt procesu uwagowego z uwzględnieniem badań EEG wykorzystujących technikę potencjałów wywołanych skorelowanych ze zdarzeniem (ang. *event-related potentials*, ERPs).

### **1.5.3. Wyniki badań elektrofizjologicznych**

Badania weryfikujące wpływ uwagi słuchowej na aktywację korową wykazują, że efekt ten jest silny (Hillyard i Kutas, 1983). Wśród potencjałów słuchowych pojawiających się około 50-200 ms od momentu pojawienia się bodźca, znajdują się trzy

podstawowe składowe: P1, N1 i P2. Uważa się, że odzwierciedlają one automatyczne przetwarzanie wywołane obecnością bodźców akustycznych (Luck, 2005). Picton i Hillyard (1974) zaobserwowali zwiększone amplitudy N1 i P2, gdy uczestnicy byli zaangażowani w bodźce słuchowe w celu wykonania zadania detekcji, w porównaniu z sytuacją, gdy kanały słuchowe były ignorowane. Na podstawie tych wyników autorzy doszli do wniosku, że wczesne komponenty drogi słuchowej przetwarzają bodźce akustyczne w podobny sposób, niezależnie od stanu uwagi słuchacza, podczas gdy kompleks N1-P2 może odzwierciedlać procesy wczesnego filtrowania percepcyjnego. Näätänen (1975) sugeruje, że uwagowe wzmocnienie amplitudy N1 jest napędzane przez wczesny proces filtrowania (Hansen i Hillyard, 1980; Kahneman, 1973 Treisman, 1960), a opóźnienie pojawienia się komponentu wzrasta wraz ze wzrostem złożoności zadania (Hansen i Hillyard, 1980), co jest zgodne z teorią obciążenia (Lavie, 1995).

Cześć badań nad przetwarzaniem uwagi poświęcono kwestii znaczenia przypisywanego bodźcom i zagadnienia nowości. Typowym układem w tego typu paradygmatach jest obecność częstych (standardowych) i rzadkich (dewiacyjnych) bodźców, różniących się charakterystyką akustyczną. Jedną z najbardziej popularnych charakterystyk ERP opisujących reakcję na bodźce rzadkie jest fala niezgodności (ang. *mismatch negativity*, MMN) występująca po około 150-250 ms od momentu prezentacji bodźca (Näätänen i in., 2007). Amplituda MMN wzrasta wraz ze wzrostem znaczenia rozpiętości różnic między bodźcami częstymi a rzadkimi (Näätänen i in., 2007), przez co jest często związana z umiejętnością dyskryminacji słuchowej. Choć wywołanie MMN nie wymaga uwagi, a jedynie przechowywania w pamięci reprezentacji bodźców (Näätänen i in., 2007), to badania sugerują, że amplituda tego komponentu jest skorelowana dodatkowo z zaangażowaniem uwagi na sygnały słuchowe (Woldorff i in., 1991, 1993) i ujemnie z koncentracją uwagi będącej wynikiem wzrostu trudności zadania (Alain i Izenberg, 2003).

W przeciwieństwie do MMN, odpowiedź w postaci dodatniego komponentu pojawiającego się około 250-500 ms po początku bodźca (P3), jest obserwowana tylko w odpowiedzi na zadania wymagające uwagi i reakcji behawioralnych (Picton i in., 1976). Odpowiedź P3 jest wywoływana przez bodźce istotne dla zadania, często w zadaniach wykrywania celu. Także bodźce, na które nie zwraca się uwagi, mogą wywoływać pojawienie się komponentu P3, jeśli są to bodźce nowe, nieoczekiwane lub bardzo natrętne, co odzwierciedla mimowolne przesunięcia uwagi (Hillyard i Kutas, 1983).



Ponieważ amplituda P3 zmienia się w zależności od pewności wykrycia i stopnia zaangażowania w zadanie (Picton i in., 1976; Key i in., 2005), uważa się, że komponent ten indeksuje procesy rozpoznawania i klasyfikacji bodźców oraz przygotowania do odpowiedzi (Key i in., 2005).

Podsumowując, amplitudy komponentów ERP wykazują wysoką siłę odpowiedzi na sygnały, na które zwracano uwagę, a neuronalne reprezentacje ignorowanych sygnałów są znacznie zredukowane lub nieobecne w późniejszych odpowiedziach korowych wyższego rzędu (Golombic i in., 2013; Hillyard i in., 1978). Podobnie, badania fMRI wskazują, że uwaga powoduje rozległą aktywację w strukturach korowych wyższego rzędu, podczas gdy aktywność związana z nieistotnymi bodźcami (niezaangażowanymi uwagą) pozostaje ograniczona głównie do kor sensorycznych (Regev i in., 2019). Informacje, na które nie zwraca się uwagi, są filtrowane na wczesnym etapie przetwarzania, co zmniejsza ilość informacji wprowadzanych do kanału, a tym samym poziom jego obciążenia. Pozwala to na konkluzję, że mechanizmy filtrowania omówione przez Broadbenta (1958), Treisman (1960) oraz Deutscha i Deutsch (1963) są obserwowalne na poziomie korowym.

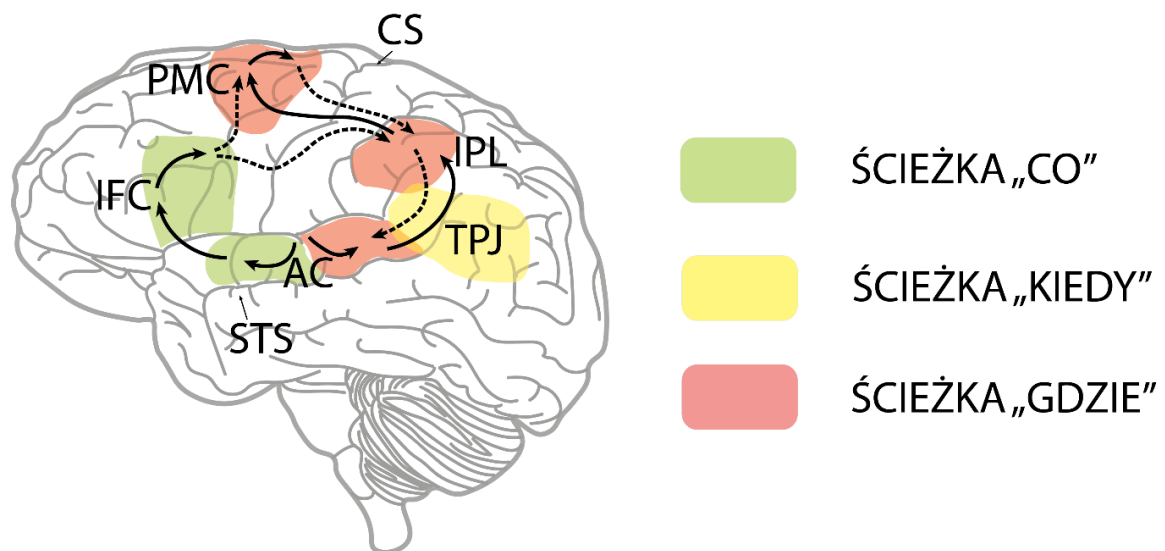
Chociaż badania nad neuronalnym podłożem sieci uwagowych są bardzo intensywne, rozumienie dokładnej roli adaptacyjnego przetwarzania ukierunkowanego na bodziec lub zadanie wciąż pozostawia wiele pytań. Szczególnym wyzwaniem w tej dziedzinie jest brak teorii, która łączyłaby wiedzę o obwodach korowych na drodze słuchowej z procesami adaptacyjnymi i poznawczymi towarzyszącymi percepcji złożonych scen akustycznych. Wiedza na temat ustaleń dla wzroku stanowi motor napędzający badania nad słuchem. Przykładem mogą być badania teoretyczne pozwalające na poznanie wspólnych cech przetwarzania aktywnej uwagi w różnych modalnościach (Corbetta i in., 2008).

#### ***1.5.4. Strumienie uwagi słuchowej: co, gdzie i kiedy***

Choć odmienne obszary neuronalne odpowiedzialne są za oddolne, odgórne i kierowane doświadczeniem ukierunkowanie uwagi, to autorzy badań nad uwagą podkreślają, że kwestią istotną jest także typ bodźca, na który ukierunkowana ma być uwaga. Proponowanym rozróżnieniem jest często cecha bodźca (jego fizyczne właściwości) oraz jego lokalizacja (Fu i in., 2020). Okazuje się, że analogicznie do wyspecjalizowanych strumieni wzrokowej uwagi selektywnej, także w korze słuchowej

istnieją ścieżki „co” i „gdzie” (rys. 4). Za identyfikację obiektów słuchowych odpowiada szlak brzuszny „co”, który obejmuje przednio-boczną część zakrętu Heschla (ang. *anterolateral Heschl' gyrus*), przednią górną część zakrętu skroniowego (ang. *anterior superior temporal gyrus*) oraz aktywację tylnej części wieczka (ang. *posteriori planum temporale*) (Baghdadi i in., 2021; Fu i in., 2020; Price i Moncrieff, 2021). Droga grzbietowa „gdzie”, która obejmuje wieczko skroniowe (ang. *planum temporale*) i tylny górny zakręt skroniowy (pSTG; ang. *superior temporal gyrus*), odpowiada za przestrzenną lokalizację obiektów słuchowych (Coull i Nobre, 1998; Fu i in., 2020; Schreiner, 1998). W ramach ścieżki „co”, sieć płaszczyzny nadskroniowej i dolnej części płata ciemieniowego (ang. *supratemporal plane-inferior parietal lobule*, STP-IPL) dynamicznie moduluje słuchową uwagę selektywną; w ramach ścieżki „gdzie”, przyśrodkowa część pSTG wykazuje reprezentację wyższego poziomu lokalizacji słuchowej poprzez integrację cech poziomu dźwięku i czasu bodźców słuchowych (Häkkinen i Rinne, 2018; Higgins i in., 2017). Ścieżka „gdzie” aktywuje się około 30 ms wcześniej niż ścieżka „co”. Sugeruje to, że odgórna informacja przestrzenna może modulować percepcję słuchową obiektów (Ahveninen i in., 2006; Alain i in., 2001).

W literaturze opisywana jest także dodatkowa (obok ścieżki „co” i „gdzie”) ścieżka „kiedy” (zwana również czasem ścieżką „jak”; ang. *how*), która dotyczy obszaru lewego skrzyżowania skroniowo-ciemieniowego (ang. *left temporoparietal junction*, TPJ) (Belin i Zatorre, 2000; Schubotz i in., 2003; Scott, 2005; Spierer i in., 2009). Istnienie ścieżki „kiedy” zostało także zaproponowane w modalności wzrokowej (Battelli i in., 2008). Ścieżka ta zasługuje na dalsze badania, ponieważ spójność temporalna jest kluczowa dla wiązania i segregowania cech w mowie oraz rozpoznawania mówcy, gdy uwaga jest zaangażowana (Bausenhardt i in., 2006; Buetti i in., 2010; Lu i in., 2017). Obszary mózgu wchodzące w skład opisanych ścieżek przetwarzania nakładają się na siebie funkcjonalnie, co sugeruje, że obszary mózgu nie są specyficzne pod względem funkcji (Bausenhardt i in., 2007; Schadwinkel i Gutschalk, 2010; Yin i in., 2014), jednak częściowo wyspecjalizowane, rozproszone przetwarzanie w ramach różnych struktur może dostarczać informacji zwrotnych ułatwiających przebieg procesu uwagowego w modalności słuchowej (Bizley i Cohen, 2013; Callejas i in., 2004).



Rysunek 4. Szlaki uwagi słuchowej: co, gdzie i kiedy [opracowanie własne na podstawie: Fu i in. (2020)]

Obserwowana aktywność mózgu jest nie tylko zależna od bodźca, ale także od zadania (Häkkinen i in, 2015). Sieci neuronalne zaangażowane w rozwiązanie sytuacji złożonej sceny akustycznej różnią się, przynajmniej w pewnym stopniu, od sytuacji z lokalizacją pojedynczego źródła dźwięku. Poza znaną siecią lokalizacji pojedynczych źródeł w cichym otoczeniu, w rozwiązanie problemu złożonej sceny akustycznej szczególnie zaangażowane są specyficzne sieci, a mianowicie obszary poddające się analizie spektrotymoralnej (ang. *spectro-temporal*) w celu efektywnej segregacji wielu strumieni dźwiękowych z różnych lokalizacji (Zündorf i in., 2013; Zündorf i in., 2014). Choć neuronalne podstawy nie są jeszcze dobrze opracowane dla złożonej sceny akustycznej, to ostatnie ustalenia z wykorzystaniem funkcjonalnego rezonansu magnetycznego pozwalają jednak stwierdzić, że zaangażowane są przede wszystkim: dwustronny tylny górny zakręt skroniowy (ang. *bilateral posteriori superior temporal gyrus*), lewa przednia część wyspy (ang. *left anterior insula*), dodatkowe pole ruchowe (ang. *supplementary motor area*) i sieć czołowo-ciemieniowa (ang. *fronto-parietal network*) w przypadku segregacji źródeł dźwięku; lewa strona wieczka (ang. *left planum temporale*) podczas wydobywania dźwięku docelowego spośród dystraktorów; oraz prawa część przedklinka (ang. *right precuneus*) w orientacji uwagi przestrzennej w kierunku celu (Zündorf i in., 2013). Zündorf i in., 2014 w badaniu porównującym zdolności osób do lokalizacji celów w obu rodzajach scen akustycznych odkryli, że kluczową rolę odgrywa w przypadku złożonej sceny akustycznej prawa strona wieczka

(ang. *right planum temporale*), a także zaangażowanie lewego dolnego obszaru czołowego (ang. *left inferior frontal*) oraz obszary przedśrodkowe i zaśrodkowe (ang. *pre- and postcentral areas*).

W przeciwieństwie do złożonej sceny akustycznej, analiza mechanizmu zaangażowanego w lokalizację izolowanego źródła dźwięku w cichym i bezechowym środowisku podejmowana była w sposób szczegółowy (Arnott i in., 2004; Recanzone, 2011). Dzięki zróżnicowaniu technik obrazowania w przeprowadzonych badaniach (Ahveninen i in., 2014; Recanzone i Cohen, 2010) możliwe jest wyodrębnienie następujących obszarów, aktywnych podczas rejestracji izolowanego źródła dźwięku: tylnogrzbietowy kanał przetwarzania słuchowego (ang. *postero-dorsal auditory processing stream*), zawierający tylne części kory słuchowej (ang. *posteriori parts of auditory cortex*), tylne górne obszary zakrętu skroniowego (ang. *posteriori superior temporal gyrus*), dolny płacik ciemieniowy (ang. *inferior parietal lobule*) i górną bruzdę czołową (ang. *superior frontal sulcus*), w przypadku poprawnego rozwiązania zadania (Arnott i in., 2004). Oprócz tego istnieją także dowody, że komponenty strumienia słuchowego (przednio-brzusze) (ang. *auditory stream [antero-ventral]*), tj. przedni płat skroniowy i dolny płat czołowy (ang. *anterior temporal lobe and inferior frontal lobe*), są aktywne podczas zadań związanych z lokalizacją dźwięku (Lewald i in., 2008; Lewald i Getzmann, 2011).

Co zatem powoduje ukierunkowanie uwagi i jakie czynniki się do tego przyczyniają? W niniejszym opracowaniu orientacja uwagi słuchowej opiera się na trzech procesach ukierunkowujących ją, zaproponowanych przez Addlemana i Jiang (2019a). Wśród źródeł orientacji uwagi uwzględniają one nie tylko własności bodźca, czynniki związane z czasem pojawienia się i lokalizacją bodźca (ang. *bottom-up*), celem i intencjami osoby (ang. *top-down*), ale także jej doświadczenie. W oparciu o powyższe komponenty tworzona jest mapa priorytetów. Funkcjonowanie map opiera się, podobnie jak w propozycji Kaya i Elhilali (2014), o Teorię Kodowania Predykcji, która omówiona zostanie w następnym rozdziale. Etapy uwagi słuchowej rozumiane są podobnie jak w modelu Eimera (2014), wyodrębniając: przygotowanie, kierowanie, selekcję i identyfikację (Schröger i in., 2015). Z kolei wnioski z badań Töllner i in. (2012), mimo skupienia wokół modalności wzrokowej, stanowią inspirację do uwzględniania wiedzy o wpływie złożoności i specyfice zadania na głębokość przetwarzania przy formułowaniu hipotez i planowaniu eksperymentów. W szczególności tyczy się

to środowiska akustycznego – uwzględnienia w badaniach prostej i złożonej sceny akustycznej (Lewald i Getzmann, 2015).

Jednym z nurtów podejmowanych w badaniach nad uwagą jest zagadnienie weryfikacji, jakie czynniki po stronie wyrazistości bodźca, aktualnych celów oraz dotychczasowej historii doświadczeń mają wpływ na orientację uwagi – zarówno na poziomie szlaku „co”, „gdzie” lub „kiedy” (na poziomie behawioralnym, jak i neuronalnym). O ile wiedza na temat oddolnych (wyrazistość) i odgórnych (aktualne cele) sposobów ukierunkowania jest już dość dobrze ugruntowana, to czynnik doświadczenia, mogący interferować z dwoma powyższymi wymaga dalszej eksploracji. Jednym z elementów doświadczenia w propozycji Addlemana i Jianga (2019) jest historia wyboru. W dalszej części opracowania przedstawiona zostanie zmienna zdająca się ściśle korespondować z historią wyboru – przewidywalność.

## 2. Przewidywalność

### 2.1. Paradygmaty badawcze podejmujące zagadnienie przewidywalności

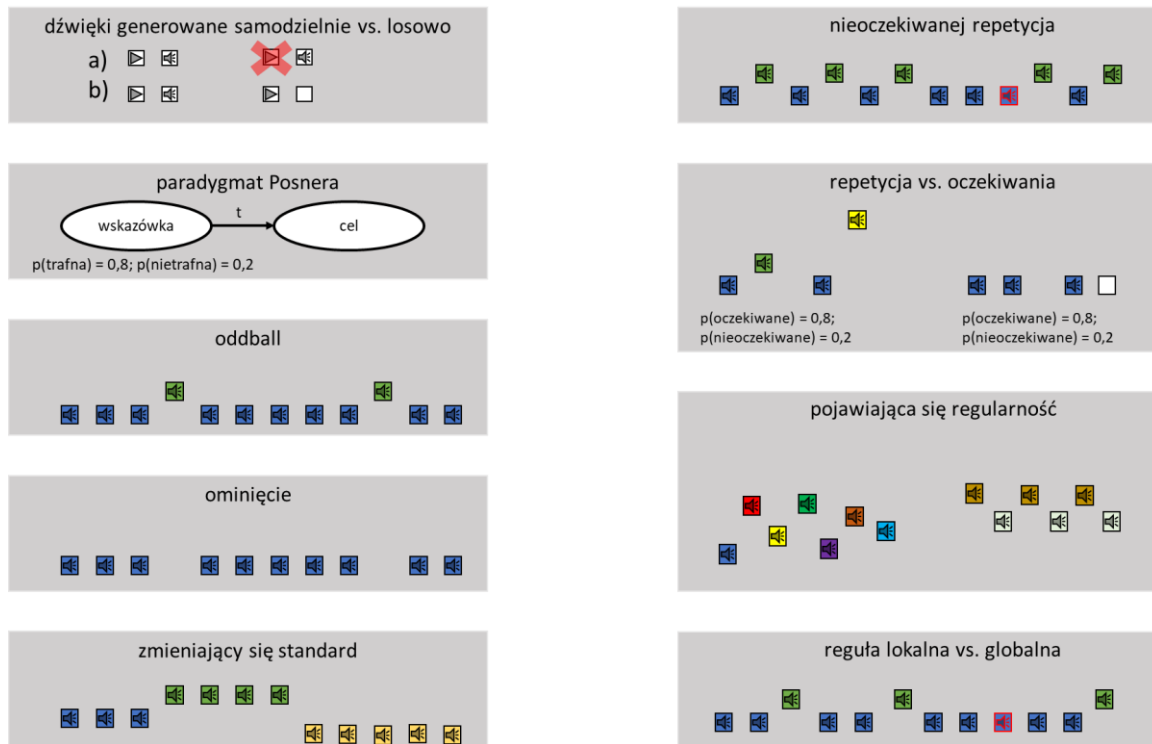
Ludzki mózg jest bardzo wrażliwy na wzorce pojawiające się w środowisku (Barakat i in., 2013; Saffran i in., 1999; Turk-Browne i in., 2009). Dotyczy to także słuchu (Bendixen, 2014; Garrido i in., 2013; Gebhart i in., 2009; Paavilainen, 2013). Wiedza o wzorcach wykorzystywana jest do poprawiania wnioskowania percepcyjnego – nawet poza świadomością. Zdolność ta jest często interpretowana jako podstawowy element mechanizmów predykcyjnych, pełniąc zarazem funkcję głównego substratu percepcji (Clark, 2013; Friston, 2005; Hohwy, 2013). Wydobywanie wzorców może opierać się na wyuczeniu pewnych zasad dotyczących probabilistycznej i sekwencyjnej natury bodźców. Uczenie to często określane jest zbiorczo uczeniem statystycznym (ang. *statistical learning*). Uczenie statystyczne nieodłącznie wiąże się z zagadnieniem przewidywalności, która pozwala osobie na generowanie przewidywań co do zdarzeń mogących mieć miejsce w przyszłości (Southwell i in., 2017).

Wśród paradygmatów pozwalających badać zagadnienie przewidywalności wyodrębnić można szereg klasycznych propozycji, które w swoim szerokim spektrum ujmują różnorakie aspekty tego zjawiska (ryc. 5). Jeden z popularnych paradygmatów polega na porównaniu reakcji na dźwięki generowane samodzielnie (wyzwalane przez naciśnięcie przycisku, a zatem przewidywalne) lub generowane losowo przez komputer

(nieprzewidywalne) (Baess i in., 2009). Z kolei paradygmat Posnera (1980) należy do klasy projektów eksperymentalnych, w których „wskazówka” (może nią być konkretny bodziec lub kontekst wywołany podczas sesji eksperymentalnej) pozwala przewidzieć cel z pewnym (ustalonym przez badacza) prawdopodobieństwem. Paradygmat ten umożliwia zatem mierzyć reakcje na cel jako funkcję jego przewidywalności (Posner, 1980). To powiązanie, obok możliwości porównania bloków, w których pewne bodźce są przewidywalne, do bloków nieprzewidywalnych, pozwala wyrazić w sposób ilościowy natężenie obserwowanych różnic.

Inną klasą paradygmatów jest zbiór zadań typu oddball, który polega na prezentacji powtarzającego się standardowego tonu, od czasu do czasu zastępowanego tonem dewiacyjnym i pomiarze fali niezgodności (ang. *Mismatch Negativity*; MMN; Jääskeläinen i in., 2004; May i Tiitinen, 2010; Näätänen i in., 1978; Paavilainen i in., 2013; Winkler i Czigler, 1998). Zadania te występują w wielu wariantach, w niektórych z nich zastępuje się rzadkie bodźce (dewiacyjne) pominięciem (ciszą; ang. *omission*) lub wprowadza nowy bodziec, który początkowo pełni funkcję bodźca rzadkiego, ale z czasem staje się nowym bodźcem „standardowym”. W zadaniu porównywane są zatem bodźce częste do bodźców rzadkich lub opisywane są procesy związane z obserwacją bodźca nieoczekiwanego. Paradygmaty badań z wykorzystaniem procedury oddball różnią się w porównaniu do paradygmatu Posnera tym, że istota problemu nie leży w porównaniach na poziomie blok „przewidywalny” vs. blok „nieprzewidywalny”, lecz bodziec „oczekiwany” vs. bodziec „nieoczekiwany”.

Ostatnią klasę bodźców stanowią te, które odwołują się do zasad łamania sekwencji na poziomie lokalnym lub globalnym, co pozwala odróżnić efekty oczekiwań stworzonych na podstawie długotrwałego doświadczenia od chwilowych efektów związanych z przypadkowym powtórzeniem na poziomie lokalnym (Barascud i in., 2016; Heilbron i Chait, 2018; Waconge i in., 2011). Ze względu na fakt, że zagadnieniem podejmowanym w niniejszej rozprawie jest kwestia weryfikacji wpływu wyuczonych prawidłowości statystycznych (przewidywalność) do sytuacji, w której nie mogą one zostać wypracowane (brak przewidywalności), to preferowanymi paradygmatami badawczymi są te, które wiążą przewidywalność z funkcją prawdopodobieństwa. To na tych paradygmatach opierać będzie się dalsza część opisu.



Rysunek 5. Popularne paradygmaty pozwalające badać przewidywalność [opracowanie własne na podstawie: Heilbron i Chait (2018)]

Przewidywalność w nurcie paradygmatów związanych z nabywaniem wiedzy o regularnościach statystycznych wiąże się bezpośrednio z uczeniem statystycznym. W jego obrębie uczenie może odbywać się na podstawie dwóch klasycznych reguł wyodrębnianych w literaturze: probabilistycznej zasady częstości (określanej jako uczenie probabilistyczne; Jabar i in., 2017; Meyniel i in., 2015) lub zasady kolejności (określana jest mianem uczenia sekwencyjnego; Conway, 2012; Daltrozzo i Conway, 2014). Zasadę częstości można scharakteryzować jako powiązanie występujących zdarzeń (np. w bloku eksperymentalnym) funkcją prawdopodobieństwa. W najprostszym ujęciu pewne bodźce występują częściej niż inne, przy czym badacz posiada kontrolę nad dystrybucją prawdopodobieństwa zdarzeń. Z kolei w przypadku zasady kolejności istnieje pewna sekwencja bodźców powtarzalna w czasie. Sekwencje mogą cechować się różną długością – jak powtarzające się naprzemiennie dwa elementy lub szereg wielu następujących po sobie składowych.

Oba typy uczenia (korzystające z zasady częstości lub kolejności) zostały zaobserwowane dla różnych modalności i sekwencji ze złożoną dynamiką (Beck i in., 2014; Daltrozzo i Conway, 2014; Emberson i in., 2011; Jabar i in., 2017). Mózg korzysta

z modeli wewnętrznych (ang. *internal models*), by przewidywać nadchodzący bodziec i by przygotowywać adekwatną odpowiedź. Przewidywalność pozwala zatem ukierunkować uwagę szybciej na bodźce, co do których człowiek jest w stanie stworzyć precyzyjne oczekiwania, w porównaniu do tych, których wystąpienie jest niepewne. Tego typu oczekiwania mogą być stworzone w sposób jawny (*explicite*), np. poprzez wskazówkę dla osoby, lub w sposób niejawny (*implicit*), np. poprzez strukturę probabilistyczną bodźców w bloku (Doherty i in., 2005). Ponieważ często kwestią otwartą jest pytanie, czy zdolność niejawnego uczenia się probabilistycznego lub sekwencyjnego przynajmniej częściowo regulowana jest przez procesy *explicite*, to niejednokrotnie unika się stosowania terminu *implicit*, a zajmuje różnymi wkładami procesów *explicite* i *implicit* (Baddeley i Wilson, 1994; Cleeremans, 2006; Haider i Frensch, 2009). W niniejszym opracowaniu termin niejawnego uczenia się statystycznego (ang. *implicit statistical learning*) dotyczy sytuacji, w których w zamierzeniu badacza osoba badana nie była uświadamiana co do obecności zasady.

Uczenie się o wzorcach występujących w środowisku, a także używanie zdobytych informacji do tworzenia predykcji o nadchodzących zdarzeniach i akcjach – jest prawdopodobnie jedną z kluczowych umiejętności człowieka (Conway i in., 2010; Goldstein i in., 2010). Uczenie się przewidywalności nie jest zarezerwowane wyłącznie dla określonej modalności ani dla pojedynczej domeny przetwarzania. W ramach poszczególnych domen rządzi się jednak własną specyfiką (Correa, 2010; Correa i in., 2010; Lange, 2013; Rimmele i in., 2011). Przykładem może być tu obecność interakcji pomiędzy tempem i modalnością prezentacji bodźców: w przypadku szybkiego tempa, niejawne słuchowe uczenie się statystyczne przeważa nad uczeniem w modalności wzrokowej. Jednak, w przypadku wolnego tempa prezentacji, niejawne statystyczne uczenie się wizualne przebiega sprawniej względem słuchowego (Emberson i in., 2011). Badania podejmowane w domenie słuchu (podobnie jak i wzroku) dotyczą oczekiwań w stosunku do bodźców charakteryzujących się pewną specyfiką ze względu na własności fizyczne, przestrzenne lub temporalne.

Wiedza na temat czasowej i przestrzennej natury przewidywalności w sposób szczególny dotyczy modalności słuchowej, a temat ten jest ostatnio silnie eksplorowany (Bendixen, 2014; Lange, 2012, 2013; Rimmele i in., 2011). W szczególności eksploracja ta wiąże się z odpowiedzią na pytanie, czy przewidywalność dotycząca prawdopodobnej lokalizacji lub czasu pojawienia się bodźca pozwala na szybsze jego dostrzeżenie. Wyniki



na ten temat są jednak niejednoznaczne (Kaya i Elhilali, 2017; Lange, 2013, Rimmele i in., 2011). W przeszłości często w wyjaśnianiu roli przewidywalności posługiwano się dychotomicznymi podziałami na procesy: (1) oddolne i odgórne, (2) niejawne i jawne. Natura przewidywalności wymyka się jednak tym klasyfikacjom. Często bowiem zasady wpisane w naturę zadań stają się uświadomione i mogą modyfikować procesy odgórne. O ile w przypadku cech obiektów słuchowych zagadnienie to zdaje się być dość dobrze zgłębione, to natura przewidywalności przestrzennej, temporalnej czy przestrzenno-temporalnej wciąż pozostawia wiele zagadek. Zagadnienie przewidywalności zdaje się także mocno wiązać z jednym z proponowanych przez Addlemana i Jiang (2019a) konstruktów budujących doświadczenie człowieka – historią wyboru. Zgodnie z dotychczasowymi obserwacjami dla modalności słuchowej, w przypadku historii wyboru największy wpływ wywierają na człowieka statystyki, prawidłowości, które zdobywane są w drodze długotrwałego uczenia się. Addleman i Jiang (2019a) zostawiają także otwartą przestrzeń do pogłębienia wiedzy na temat natury tych prawidłowości, sugerując, że historia wyboru może być czynnikiem o dużym stopniu złożoności. Zasada częstości i kolejności zdają się wpisywać w to zróżnicowanie. Różnią się one od siebie dynamiką i charakterystyką, co skłoniło do podjęcia autorskiej modyfikacji modelu Addlemana i Jiang (2019a) poprzez wprowadzenie do niego zasady częstości i kolejności jako składowych historii wyboru. Poniżej przedstawiony zostanie stan wiedzy na temat przewidywalności słuchowej budowanej na podstawie zasady częstości lub kolejności – przede wszystkim dla uczenia się czasu i lokalizacji pojawiania się dźwięków.

## **2.2. Zasada częstości**

W przypadku zasady częstości wskazówka probabilistyczna może pozwolić na przewidywanie pojawienia się pewnej cechy bodźca, jego lokalizacji lub czasu z określonym wcześniej prawdopodobieństwem. Obecne paradygmaty obejmują zarówno jawną, jak i niejawną formę uczenia się zasady (Doherty i in., 2005; Emberson i in., 2011; Posner, 1980; Rimmele i in., 2011; Spence i Driver, 1996). Z formą jawną można mieć do czynienia, gdy zasada podana jest wprost, a dodatkowo występuje wskazówka symboliczna (np. strzałka), która jest informatywna w stosunku do pojawienia się celu. Klasycznym przykładem tego typu badań jest paradygmat proponowany przez Posnera (1980). W zadaniu zasoby przetwarzania są podzielone (ang. *divided*), choć nierównomiernie, pomiędzy oczekiwany i nieoczekiwany bodziec, ponieważ

zarówno jeden, jak i drugi związany jest z odpowiedzią. Kierowanie wskazówką przede wszystkim manipuluje prawdopodobieństwem wystąpienia bodźca i stąd – oczekiwaniami uczestników badania. Dodatkową konsekwencją oczekiwań jest fakt, że uczestnicy badania mogą sukcesywnie angażować się w predykcje, który dźwięk będzie prezentowany jako następny (lub w jakiej lokalizacji itd.).

Zasada niejawna odnosi się z kolei do sytuacji, w której osoba badana nie zostaje poinformowana o zasadzie organizacji statystycznej bodźców w bloku. Nie występują tutaj także elementy, które mogłyby wskazywać na obecność tego typu organizacji (brak strzałki). Najczęściej tego typu efekt uzyskuje się, wpisując pewną zasadę probabilistyczną w ramach bloku, na który składa się szereg prób. Niezależnie od rodzaju stosowanej zasady, można zaobserwować bloki o nierównej proporcji wskazówek trafnych do nietrafnych (np. występowanie bodźców z częstością 70% w lokalizacji A i po 10% w lokalizacjach B, C i D) oraz bloki o równej proporcji wskazówek trafnych do nietrafnych (np. występowanie bodźców z równą częstością 25% w lokalizacjach A, B, C i D). Układ nierównej proporcji wskazówek często określany jest mianem pewnego (ang. *certainty*), choć termin ten może mylnie wskazywać na pełną przewidywalność występowania bodźców. Termin bloku przewidywalnego (ang. *predictable*) zdaje się trafniej oddawać naturę organizacji statystycznej bodźców. Mniej kontrowersyjny ze względu na nazewnictwo jest z kolei blok zawierający równe proporcje wskazówek, który określany jest jako niepewny (ang. *uncertainty*) lub nieprzewidywalny (ang. *unpredictable*; Dayan i Yu, 2003).

### **2.3. Przewidywalna częstość w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo-przestrzennym**

W przypadku przewidywalności temporalnej bodźce mogą występować częściej w jednym z kilku interwałów (w porównaniu do pozostałych, które cechują się rzadszą dystrybucją). Dla przykładu bodziec może pojawiać się częściej po 800 ms od rozpoczęcia próby (np. 80% wszystkich prób w bloku), a rzadziej po 600 ms od rozpoczęcia próby (np. 20% pozostałej części prób w bloku). Oczekiwanie dotyczące tego, kiedy coś wystąpi (stanie się) jest zazwyczaj określane mianem oczekiwań czasowych (ang. *time expectancy*, TE; Vangkilde i in., 2012; Weinbach i Henik, 2012). Badania nad oczekiwaniami czasowymi mają długą historię w naukach poznawczych i są jednocześnie bardzo mocno eksplorowanym obszarem wiedzy (Lange, 2013; Lejeune i Wearden, 2009; Los

i Horoufchin, 2011; Matthias i in., 2010; Rimmele i in., 2011; Sperduti i in., 2011). W badaniach oczekiwań czasowych jednym z najpopularniejszych jest paradygmat poprzedzania (ang. *foreperiod paradigm*; FP; Herbst i Obleser, 2018; Thomaschke i in., 2016). W paradygmacie tym cel zapowiedziany jest przez poprzedzający bodziec ostrzegający. Paradygmat poprzedzania odwołuje się do interwału pomiędzy bodźcem ostrzegającym i celem. Jeśli interwały są stałe wewnątrz eksperymentalnego bloku, to bodziec ostrzegający pozwala co do zasady na dokładne predykcje temporalne wystąpienia celu.

Kwestią kluczową dla oczekiwań czasowych jest ich niezależność od oczekiwań co do samego zdarzenia (Weinbach i Henik, 2012). W związku z tym, oczekiwania czasowe były zazwyczaj badane w scenariuszach, w których oczekiwanie zdarzenia było probabilistycznie zrównoważone. Przykładem może być zadanie dotyczące dyskryminacji dwóch dźwięków ze względu na jedną z ich cech (np. wysokość) – przy czym szansa pojawienia się każdego z nich jest równie prawdopodobna. Co za tym idzie, czas pojawienia się celu nie jest informatywny w kontekście zdarzenia, które ma nastąpić. W konsekwencji, cel osoby badanej może być stały dla wszystkich prób (Elliot, 1973; Frith i Done, 1986) lub zbalansowany pomiędzy różnymi interwałami (Kingstone, 1992; Steinborn i in., 2009).

W przypadku przewidywalności przestrzennej osoba jest w stanie wytworzyć oczekiwania na temat tego, gdzie najprawdopodobniej pojawi się bodziec. Częstym sposobem na tworzenie oczekiwań osoby jest wykorzystywanie własności probabilistycznych poszczególnych lokalizacji (Addleman i Jiang, 2019a; Beck i in., 2014). Innymi słowy, bodźce pojawiające się w częstszych lokalizacjach są jednocześnie bardziej oczekiwanymi w stosunku do rzadkich lokalizacji. Może to odbywać się w sposób zarówno jawny (poinformowanie, że bodziec pojawia się częściej w pewnej lokalizacji, np. Spence i Driver, 1996) lub niejawnym (osoba musi wyuczyć się w ramach kolejnych prób zasady przestrzennej). O ile w przypadku jawnego budowania przewidywalności wskazówka wyznaczająca lokalizację celu może go poprzedzać lub występować równoległe z nim, to w przypadku niejawnego przekazywania zasady probabilistyczna wskazówka przestrzenna pokrywa się najczęściej z czasem trwania dźwięku (a więc z celem) i wpisana jest w cały blok prób. W jednym z badań osoby zgadywały, czy wymawiane słowa są parzyste czy nieparzyste, natomiast cel występował częściej w jednej z lokalizacji w porównaniu do pozostałych trzech (Addleman i Jiang, 2019b).

Pomimo braku informacji na temat prawdopodobieństwa lokalizacji, uczestnicy byli szybsi w identyfikowaniu celów pojawiających się w lokalizacji o wysokim prawdopodobieństwie w porównaniu do miejsc o niskim prawdopodobieństwie pojawienia się dźwięku.

Przewidywalność temporalno-przestrzenna dla zasady częstości pozwala na interakcję obu wymiarów. Osoba może dzięki niej polegać na synergistycznym działaniu obu wskazówek – obiekt występuje częściej w określonym interwale i w określonej lokalizacji niż w jakiegokolwiek innej konfiguracji czasu i przestrzeni. W przypadku przewidywalności czasowo-temporalnej jedną z prób integracji obu wymiarów podjęli Rimmele i in. (2011), którzy w sposób utajony manipulowali zarówno zasadą częstości, jak i kolejności dla oczekiwań czasowych i przestrzennych. Choć eksperyment został zaprojektowany w oparciu o paradygmat wprowadzony przez Doherty i in. (2005), który ma charakteryzować się zasadą wyrażoną w sposób naturalistyczny za pomocą „ruchu” dźwięku w ramach czasu i przestrzeni, to możliwe jest wyodrębnienie w nich elementów wspólnych z zasadą częstości i kolejności. Zasada częstości związana z czasem polegała na obecności bloków pozwalających wytworzyć oczekiwania o pewnej obecności celu po określonym interwale (stały interwał). Porównywane były one z blokami, w ramach których tego typu predykcji nie można było wytworzyć (interwał między wskazówką a bodźcem był dla każdej próby zróżnicowany w czasie). W przypadku manipulacji lokalizacją – stały dystans pomiędzy poszczególnymi odległościami zestawiany był z losowym dystansem niepozwalającym na utworzenie predykcji na temat częstości występowania odległości pomiędzy kolejnymi dźwiękami. Warto zauważyć, że z perspektywy zasady częstości każda z lokalizacji pojawiała się tylko raz dla każdego z bloków, miała zatem równe prawdopodobieństwo wystąpienia. W interpretacji wyników zespół Rimmele i in. (2011) nie odwoływał się jednak do własności probabilistycznych, a do uczenia w oparciu o ruch. Zasada kolejności dla powyższego badania omówiona zostanie w następnym podrozdziale.

#### **2.4. Zasada kolejności**

Rozpatrując sekwencyjne wzorce bodźców, często w skrócie używa się terminów statystyczno-sekwencyjnego uczenia się lub po prostu uczenia sekwencyjnego (ang. *sequential learning*, SL) (zasada kolejności). Zgodnie z powyższym, uczenie się statystyczno-sekwencyjne dotyczy zdolności do uczenia się podstawowych,

ustrukturalizowanych wzorców, które istnieją pomiędzy lub w ramach zestawów nielosowych, sekwencyjnie prezentowanych bodźców (Conway i Christiansen, 2001).

Tradycyjnie uczenie się statystyczno-sekwencyjne uważane jest za zawierające aktywację automatycznego, a nawet nieświadomego przetwarzania (Saffran i in., 1996, 1997; Shanks i Perruchet, 2002; Turk-Browne i in., 2005). Kwestia ta jest jednak wciąż kontrowersyjna. Kilka empirycznych nurtów badawczych nad uczeniem się statystyczno-sekwencyjnym zasugerowało, że poziom świadomości nie jest ważny dla wykonania zadania opartego na zasadzie kolejności (Goschke, 1998; Song i in., 2007). Clegg i in. (1998) z kolei sugerują, że uczenie się statystyczno-sekwencyjne nie manipuluje jawnymi reprezentacjami wiedzy. To wiedza jawna wyrasta z interakcji uczenia się statystyczno-sekwencyjnego z innymi poznawczymi systemami, które mogą mieć dostęp do jawnych wspomnień i jawnej pamięci i modyfikować je (Clegg i in., 1998). Alternatywnie, inne teorie przemawiały za bardziej bezpośrednim udziałem przetwarzania jawnego w uczeniu się statystyczno-sekwencyjnym. Cleeremans (2006) sugerował, że reprezentacja uzyskana z ekspozycji sekwencji może stać się jawna, gdy siła aktywacji tej reprezentacji osiągnie krytyczny poziom. Podobnie jawna wiedza (ang. *explicit knowledge*) może wyrosnąć jako wynik procesu szukania, który jest wywołany przez nieoczekiwane zdarzenia występujące podczas przetwarzania zadania i wymagające ich wyjaśnienia (Haider i Frensch, 2009). W niniejszym opracowaniu jawne uczenie się rozumiane jest jako sytuacja, w której zasada podana jest osobie wprost, a także każda kolejna próba poprzedzona jest wskazówką, przy czym wskazówki te w ramach kolejnych prób tworzą określoną sekwencję (np. ze względu na lokalizację). Z kolei w przypadku niejawnego uczenia się zasady, jest ona zaimplementowana, lecz utajona, a kolejne bodźce nie są poprzedzone wskazówkami symbolicznymi. Innymi słowy, wiedza o obecności zasad może zostać wyuczona jedynie w oparciu o doświadczenie, jednak warunkiem koniecznym do wyuczenia się zasady nie jest tutaj uświadomienie jej sobie.

## **2.5. Przewidywalna kolejność w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo-przestrzennym**

Spostrzegając czasowo regularne, powtarzające się sekwencje bodźców, oczekujemy, że ten wzorec będzie się powtarzał. Część badań nad przewidywalnością w domenie słuchu dotyczyła sytuacji, w której weryfikowano wpływ temporalnej regularności sekwencji dźwięków na przetwarzanie kolejnych bodźców w późniejszych

próbach (Bendixen, 2014; Schwartze i in., 2011). Większość badań porównywała przetwarzanie bodźców pomiędzy warunkami, gdzie cel występował po regularnej/nierregularnej sekwencji (Doherty i in., 2005; Lange, 2009, 2010; Rimmele i in., 2011; Rohenkohl i Nobre, 2011), ale także pomiędzy warunkami, gdzie bodźce następowały po regularnych sekwencjach, ale różnych interwałach (Correa i Nobre, 2008; Sanabria i Correa, 2013).

W przypadku zasady kolejności jednym z zespołów, który podjął się zagadnienia uczenia sekwencyjnego pozwalającego wytworzyć oczekiwania co do lokalizacji przyszłych dźwięków, byli Rimmele i in. (2011). Wiedza o lokalizacji obiektu nabywana była w oparciu o doświadczenie. O ile wskazówka przestrzenna wykazywała własności statystyczne charakterystyczne także dla zasady częstości, to w ramach następných prób kolejne dźwięki tworzyły określoną powtarzalną sekwencję. Na podstawie pozornego ruchu dźwięku w ramach kolejnych prób w bloku osoby także mogły dokonywać oczekiwań co do kolejnej lokalizacji bodźca. Osoba mogła zatem uczyć się regularności zarówno w oparciu o pozorny ruch dźwięku, jak i powtarzające się, regularne sekwencje. Blok z regularnymi sekwencjami zestawiany był z blokiem nieprzewidywalnym, w którym nie można było tego typu predykcji utworzyć. Zespół Rimmele i in. (2011) podjął się także próby stworzenia przestrzeni eksperymentalnej dla przewidywalności temporalno-przestrzennej. Kolejne interwały i kolejne lokalizacje tworzyły stałą strukturę powtarzalną w bloku i zestawione zostały z sytuacją pełnej losowości interwałów i lokalizacji w bloku.

Paradygmaty wykorzystujące przewidywalność nabytą w oparciu o zasadę częstości i kolejności z powodzeniem zostały zaimplementowane dla prostej sceny akustycznej. Mimo to, wiedza na temat przewidywalności w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo-przestrzennym wciąż nie jest silnie ugruntowana, szczególnie w przypadku uczenia niejawnego. Jeszcze mniejsza liczba ustaleń dotyczy scen akustycznych bliższych naturalnym, tj. takim, w których występuje więcej źródeł dźwięku. Część dotychczasowych badań poświęcona została próbie weryfikacji, czy powyższe efekty możliwe są do zaobserwowania również w przypadku złożonej sceny akustycznej – co jest określane jako analiza sceny akustycznej (ang. *acoustic scene analysis*, ASA). W ostatnim czasie nastąpił gwałtowny wzrost liczby eksperymentalnych i teoretycznych prac na ten temat, wynikający z fundamentalnych zmian dotyczących rozumienia sposobu, w jaki mózg wydobywa przewidywalność z serii zdarzeń sensorycznych (Bendixen, 2014).

Poniżej przedstawione zostaną ustalenia dotyczące roli przewidywalności w zakresie złożonej sceny akustycznej.

## **2.6. Badania nad rolą przewidywalności w złożonej scenie akustycznej**

Podczas analizy sceny akustycznej jednym z podstawowych procesów pozwalających zidentyfikować poszczególne dźwięki jest rozdzielenie mieszaniny nakładających się na siebie sygnałów (Bendixen, 2014). To rozdzielenie często określane jest mianem dekompozycji i przyjmuje dwie formy. Pierwsza określana jest mianem grupowania współbieżnego/pionowego (Bregman, 1990) i dotyczy sygnałów występujących w tym samym czasie. Słuchacz musi zinterpretować, czy emituje je to samo, czy inne źródło dźwięku. Podczas dekompozycji opiera się na wskazówkach współwystępujących z sygnałami dźwiękowymi takich jak lokalizacja, harmonicznosc i synchronizacja początkowa (McDonald i Alain, 2005; Lipp i in., 2010). Drugi rodzaj wskazówek to te, które nie niosą informacji same w sobie, ale są informacyjne tylko w porównaniu z poprzednimi sygnałami. Jedną z takich wskazówek może być fakt, że następujące po sobie dźwięki cechują się tą samą charakterystyką – jak wysokość, barwa, ale także czas pojawienia się i lokalizacja. Ten drugi rodzaj dekompozycji sygnału nazywany jest grupowaniem sekwencyjnym/poziomym (Bregman, 1990) i dotyczy interpretacji relacji pomiędzy różnymi sygnałami słuchowymi, które następują po sobie w czasie.

Powyższy podział form dekompozycji wiąże się z obserwacją, że regularność występujących zjawisk może dotyczyć nie tylko stałych wartości cech, ale także wartości zmieniających się w regularny sposób w czasie (Winkler, 2007). System słuchowy wykazuje duży potencjał w wykrywaniu relacji między kolejnymi dźwiękami w sekwencji (Näätänen i in., 2001, 2010). Ekstrakcję regularności uznano za tożsamą z przewidywalnością budowaną na podstawie sekwencji dźwięków (Tiitinen i in., 1994; Winkler i in., 1996) i stwierdzono, że wyodrębniona informacja może być wykorzystywana do przewidywania nadchodzących dźwięków (Baldeweg, 2006). Przetwarzanie danych sensorycznych w sposób predykcyjny stało się ważnym elementem ogólnych teorii percepcji (Friston, 2005, 2010; Gregory, 1980; Schubotz, 2007). Choć wciąż brak jest silnych podstaw mechanizmów neuronalnych dla wpływu przewidywalności na analizę sceny akustycznej (May i Tiitinen, 2010; Näätänen i in., 2005), to nie ulega wątpliwości, że układ słuchowy bez wysiłku pozyskuje informacje o regularnej strukturze otaczających

go źródeł dźwięku. Oznacza to, że informacja dotycząca regularności jest nieodłączną właściwością przetwarzania informacji sensorycznej. Informacja o regularnych cechach źródeł dźwięku jest dostępna dla systemu słuchowego na wczesnych etapach przetwarzania – nawet w ciągu 20-40 ms od początku dźwięku (Grimm i in., 2011). W rzeczywistości pojęcie predykcji sugeruje, że taka informacja powinna być dostępna nawet przed pojawieniem się kolejnego sygnału emitowanego przez dane źródło dźwięku (Baldeweg, 2006; Bendixen i in., 2009, 2012a).

Główna oś badań nad przewidywalnością w sytuacji złożonej sceny akustycznej poświęcona była próbie odpowiedzi na pytanie, czy może być ona wykorzystana jako wczesna wskazówka w analizie sceny akustycznej. Początkowo odpowiedź wydawała się być raczej negatywna, a rolę przewidywalności sprowadzono do procesów wysokopoziomowych, wymagających zaangażowania uwagi (Bregman, 1990; Drake i in., 2000; Jones, 1976; Jones i in., 1981, 1982). Funkcjonalna rola przewidywalności w analizie sceny akustycznej nie uzyskała dużego wsparcia empirycznego. W rzeczywistości wyniki wczesnych badań nad analizą sceny akustycznej (George i Bregman, 1989; Rogers i Bregman, 1993) sugerowały, że przewidywalność dźwięku nie wpływa na segregację lub integrację strumienia słuchowego. W literaturze pojawiła się argumentacja, że spostrzeżenia dotyczące przetwarzania predykcyjnego w przypadku prostej sceny akustycznej nie są możliwe do przeniesienia do złożonej sceny akustycznej, ponieważ prawie wszystkie ustalenia zostały uzyskane w sztucznie uproszczonych sytuacjach eksperymentalnych.

Mimo początkowych niepowodzeń, niektóre badania wykazały, że możliwe jest monitorowanie regularności w co najmniej trzech strumieniach dźwięków jednocześnie (Nager i in., 2003; Sussman i in., 2005; Winkler i in., 2003). W połączeniu ze złożonymi formami przewidywalności, które mogą być odkrywane bez zaangażowania uwagi (Näätänen i in., 2001, 2010) uznano, że analizy słuchowe mogą przetwarzać znacznie bardziej złożone scenariusze niż wcześniej zakładano (Nelken, 2004). Stało się to motorem napędzającym kolejne badania weryfikujące rolę przewidywalności w analizie sceny akustycznej, które dodatkowo motywowane były rozwojem wiedzy dotyczącej przetwarzania predykcyjnego w dziedzinie słuchu (Andreou i in., 2011; Bendixen i in., 2010, 2012b, 2013; Devergie i in., 2010; Rimmele i in., 2012). Wyniki potwierdziły, że przewidywalność może być wykorzystywana jako wskazówka w analizie sceny akustycznej. Tym razem uwzględniono jednak w badaniach ścisłą kontrolę nad organizacją



statystyczną bodźców. Zwracano uwagę, aby nie wprowadzić efektu konfundującego polegającego na równoległym wpływananiu na segregację (np. rozdzielanie dźwięków A od B) i integrację strumieni (traktowanie dźwięków jako tworzących całość w czasie) – co miało miejsce w poprzednich badaniach. Innymi słowy – wprowadzenie przewidywalności globalnej dla dźwięków jako takich, a także lokalnej dla każdego z dźwięków z osobna może znosić efekt facylitacji. Brak efektu zaobserwowany przez Jones i in. (1981, 1982) mógł zatem być wynikiem równoległych, jednak przeciwstawnych efektów, co doprowadziło do niezaobserwowania wpływu przewidywalności. Powyższe obserwacje pozwalają na konkluzję, że w eksperymentach nad przewidywalnością manipulacje dotyczące ogólnej sekwencji i oddzielnych strumieni powinny być prowadzone niezależnie (George i Bregman, 1989). Co więcej, dowody empiryczne na korzyść lub niekorzyść efektów przewidywalności dźwięku w analizie sceny akustycznej dostarczały często niejednoznacznych wyników ze względu na brak ścisłej kontroli zmiennych wpływających na umiejętność wyuczenia się przewidywalności. W niektórych przypadkach formalnie przewidywalne sekwencje tonów są traktowane przez system słuchowy tak, jakby były nieprzewidywalne, ponieważ przewidywalny wzór zawiera zbyt wiele elementów lub obejmuje zbyt długi czas, przekraczając tym samym możliwości pamięci roboczej (Boh i in., 2011; Scherg i in., 1989; Sussman i in., 1999; Sussman i Gumenyuk, 2005). Obecność efektu wpływu przewidywalności na analizę sceny akustycznej jest zatem warunkowa, ponieważ stanowi wypadkową wielu czynników – dotyczących przede wszystkim organizacji statystycznej prezentowanych bodźców.

Mimo że efekt przewidywalności w analizie sceny akustycznej został potwierdzony, to wciąż kwestią otwartą jest pytanie, jak przewidywalność wpływa na tę analizę. Lange (2013) proponuje, że efekty są dwojakie – przewidywalność ułatwia zarówno organizację dźwięków, jak i przebieg procesów uwagi. Bendixen i in. (2012b) wspierają tę obserwację, dowodząc, że wpływ przewidywalności obejmuje więcej niż alokację uwagi. Przeduwagowy (Sussman, 2007) system słuchowy wydaje się być więc wyposażony w oddolny mechanizm rozdzielający mieszaninę strumieni dźwiękowych wyłącznie na podstawie przewidywalności tych strumieni. Wniosek ten jest zgodny z poglądem, że przetwarzanie predycyjne jest „trybem domyślnym” mózgu (Friston, 2005, 2010) i wykracza poza ramy, w których rola przewidywalności ograniczona jest do etapu analizy sceny akustycznej z udziałem uwagi. Zgodne wyniki obiektywnych i subiektywnych procedur słuchania nie oznaczają jednak, że efekty przewidywalności są

w całości przypisywane procesom organizacji dźwięku, a nie uwadze. Badanie Bregman (1990) pokazuje, że przewidywalne sekwencje są łatwiejsze do utrzymania w centrum uwagi. To, w jaki sposób mózg wykorzystuje przewidywalność do kierowania uwagi w stronę lub z dala od przychodzących bodźców jest obszarem silnie eksplorowanym (Henry i Herrmann, 2014).

Niezależnie od typu sceny akustycznej, wyuczone prawidłowości pozwalają na tworzenie coraz bardziej precyzyjnych oczekiwań w stosunku do zdarzeń występujących w środowisku. Dotychczasowe badania wskazują na przynajmniej częściowy wpływ przewidywalności na uwagę podczas analizy sceny akustycznej. Co więcej, elementy predykcyjne zostały z powodzeniem zaimplementowane w obliczeniowych podejściach do modelowania analizy scen akustycznych (Ellis, 1999; Godsmark i Brown, 1999; Grossberg i in., 2004). Jaka jest dynamika relacji między przewidywalnością a uwagą? Jaki jest mechanizm facylitacyjny tej relacji na przetwarzanie bodźców? Propozycję odpowiedzi na to pytanie dostarcza Teoria Kodowania Predykcyjnego (TKP) – prawdopodobnie jedna ze współcześnie najbardziej zaawansowanych teorii percepcji (Friston, 2005, 2010).

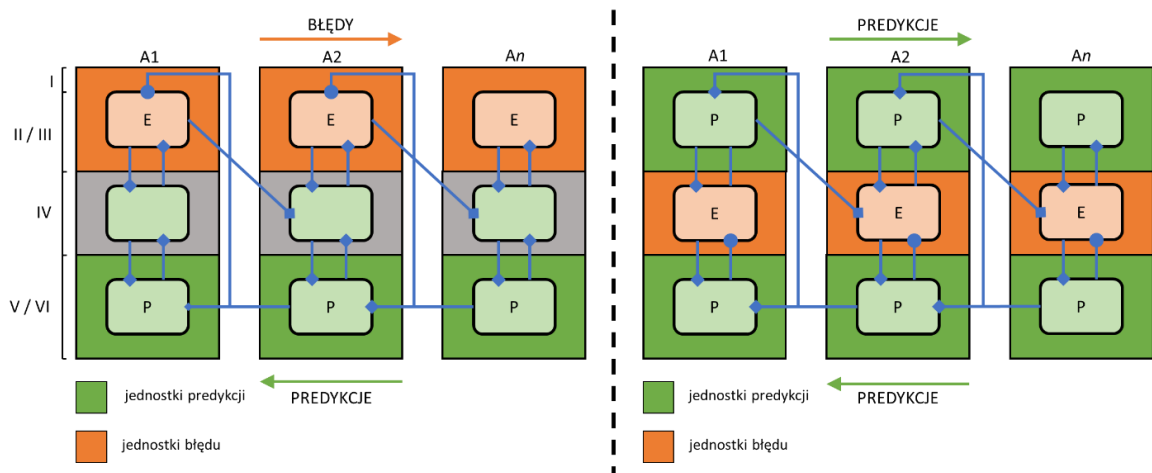
## **2.7. Teoria Kodowania Predykcyjnego**

Teoria Kodowania Predykcyjnego (TKP) stanowi jedną z kluczowych teorii pozwalających wyjaśnić naturę przewidywań (Clark, 2013; Rao i Ballard, 1999). Zgodnie z nią umysł pozwala na stałą kreację i aktualizację przewidywań na temat świata (Szewczyk i Wojtasiński, 2021). W świetle TKP szlaki odgórne odpowiedzialne są za tworzenie przewidywań, natomiast oddolne – kodują rozbieżność między oczekiwaniami a stanem świata. Wnioskowanie polega na konstrukcji hierarchicznego, generatywnego modelu świata. Pozwala on na odgórne tworzenie wzorców aktywności, które zewnętrzne bodźce wywołałyby oddolnie. Model jest stale precyzowany, by poprawić jakość predykcji nadchodzących bodźców. Te wstępnie przygotowane odpowiedzi kompensują opóźnienia neuronalnego przetwarzania i akcelerują operacje neuronalne. Nieprawidłowe predykcje są często wynikiem niedokładnego modelu wewnętrznego i skutkują nieprawidłowymi reakcjami (Bubic i in., 2010). Zgodnie z TKP model wewnętrzny i system przekonań powinien zatem być stale aktualizowany (ang. *belief updating*), dokonując korekt w oparciu o błędy predykcji. Wtedy to oczekiwania w przyszłych wnioskowaniach (*a priori*) mogą być bardziej precyzyjne, uwzględniając przesłanki z wnioskowań poprzednich

(*a posteriori*). Błędy predykcji przyczyniają się zatem do zwiększonej dokładności oszacowań – i z czasem zmodyfikowania modelu dzięki możliwości uczenia się. TKP oferuje wyjaśnienie zarówno zjawisk z zakresu psychologii (Knill i Pouget, 2004), neuroanatomii (Friston, 2005), a także elektrofizjologii (Rao i Ballard, 1999). Co więcej, TKP wyjaśnia sposób, w jaki kodowane są informacje na poziomie neuronalnym. O ile wciąż nie udało się potwierdzić istnienia neuronów predykcji i neuronów błędu, które postuluje TKP, to teoria ta stanowi jedną z najsilniejszych współcześnie prób wyjaśnienia organizacji neuronalnej funkcjonującej u człowieka (Kogo i Trengove, 2015).

Zgodnie z propozycją TKP, kora sensoryczna jest zorganizowana hierarchicznie (Wacongne i in., 2011). Na każdym poziomie przetwarzania, neurony integrują informacje dostarczane od wielu neuronów z piętra leżącego poniżej, a co za tym idzie, kodują coraz bardziej abstrakcyjną informację (informacje) w coraz większych przedziałach czasowych i przestrzennych. Jednak kora mózgowa jest wzajemnie połączona, więc neurony także otrzymują informacje od poziomu powyżej (Felleman i van Essen, 1991). Tradycyjnie zakładano, że wyższe piętra modulowały niższe poziomy, np. poprzez priorytetyzowanie przetwarzania określonych sygnałów nad innymi. W propozycji Mumforda (1992), abstrakcyjna informacja na wyższych poziomach informuje i potencjalnie ukierunkowuje neurony na niższych piętrach poprzez aprioryczny sygnał będący na daną chwilę „najlepszym przypuszczeniem” (ang. *best guess*). Z kolei na niższych poziomach różnica pomiędzy przewidywaną i aktualną aktywnością wywołuje błąd predykcji (ang. *prediction error*), który jest skierowany do poziomu wyżej, gdzie jest używany do wygenerowania nowego i udoskonalonego szacunku *a posteriori*. Proces ten jest powtarzany symultanicznie w całej hierarchii, do czasu aż osiągnięta zostanie najbardziej prawdopodobna estymacja.

W standardowej wersji TKP (Bastos i in., 2012; Friston, 2005; Rao i Ballard, 1999) – ścisła korowa asymetria występuje pomiędzy połączeniami zstępującymi (ang. *backward connections*, wstecznymi, cofającymi się) będącymi nośnikami predykcji a połączeniami wstępującymi (ang. *forward connections*, idącymi do przodu) niosącymi błędy predykcji. Ponieważ połączenia wstępujące powstają w warstwach powierzchniowych (II/III), a zstępujące w warstwach głębokich (V/VI) (Felleman i van Essen, 1991), ta asymetria ma prostą anatomiczną konsekwencję: neurony predykcyjne rezydują w głębokich warstwach, a neurony błędu w warstwach powierzchniowych.



Rysunek 6. Propozycje układów neuronów błędów i neuronów predykcji dla TKP w wersji tradycyjnej (po lewej) lub opartej na modelach uprzedzonej konkurencji (po prawej). Kolumny oznaczają hierarchicznie ułożone kolumny korowe odpowiadające korze pierwotnej (A1) drugorzędowej (A2) i wyższych rzędów (An). [opracowanie własne na podstawie: Heilbron i Chait (2018)]

W przypadku tradycyjnie rozumianej TKP błędy przebiegają w górę (ang. *upward*), a predykcje w dół (ang. *downward*). Jednostki predykcji mogą tłumić jednostki błędów na niższych poziomach za pośrednictwem polisynaptycznego odgórnego wychwytywania zwrotnego (ang. *top-down inhibitory connections*). Model klasyczny nie jest jedynym, który proponuje implementacje TKP. Inne modele proponują różne zaaranżowania, niektóre rezygnują z funkcjonalnej asymetrii pomiędzy połączeniami w przód i w tył i lokują neurony predykcji i błędów inaczej (Spratling, 2008a,b, 2010). W modelach TKP opartych na uprzedzonej konkurencji (Spratling, 2008a,b; po prawej) oczekiwania przebiegają w górę i w dół, natomiast błąd jest obliczany w warstwie wejściowej (IV). Jednostki przewidywania tłumią jednostki błędów tylko poprzez wewnątrzcolumnową inhibicję, a połączenia góra-dół są w pełni pobudzające (por. czarne strzałki na rys. 6).

Wszystkie propozycje w ramach TKP zakładają, że predykcje i błędy są obliczane za pomocą rozdzielnych neuronów w różnych korowych układach – przez co odpowiedzi predykcji i błędów cechują się rozdzielnym profilem laminarnym (Denham i Winkler, 2006). Ważenie oczekiwań, pewności oraz niepewności co do zdarzeń występujących w środowisku wpływa na wnioskowanie i uczenie się w różny sposób. Podczas wnioskowania rzetelne sygnały wejściowe są ważone jako silniejsze/ważniejsze, a TKP proponuje, by zwracanie uwagi na cechę oznaczało oczekiwanie, że sygnał z tą cechą będzie wiarygodny, rzetelny lub informatywny, a zatem traktowany priorytetowo

przy przetwarzaniu (Feldman i Friston, 2010). Siła odpowiedzi powinna zatem zawsze być funkcją zarówno wielkości błędu, jak i jego precyzji. Innymi słowy, każda odpowiedź mózgu powinna być wrażliwa na modulację uwagi (ang. *attentional modulation*).

Niezależnie od sposobu nabywania przewidywalności (na podstawie uczenia probabilistycznego lub sekwencyjnego), dróg jej podania (w sposób jawny lub niejawny), a także wymiaru (czasowy, przestrzenny, czasowy i przestrzenny) zaobserwować można, że oczekiwania ściśle korespondują z podstawową funkcją polegającą na możliwości ukierunkowania swojej uwagi na cel (z przyspieszoną percepcją). W kolejnym rozdziale zaprezentowany zostanie przegląd badań ukazujących relację pomiędzy przewidywalnością (predykcją) a uwagą słuchową – przede wszystkim w wymiarze przewidywalności przestrzennej, czasowej oraz czasowo-przestrzennej.

### **3. Mechanizm wpływu przewidywalności bodźców słuchowych na orientację uwagi w zadaniach percepcyjnych**

Przewidywanie i uwaga są konstruktami teoretycznymi o długiej tradycji badań w psychologii poznawczej. Przewidywanie oznacza mechanizm wnioskowania w służbie percepcji, który bierze pod uwagę wcześniejsze informacje podczas interpretacji danych zmysłowych. Uwaga to hipotetyczny mechanizm służący percepcji, który ułatwia przetwarzanie ważnych informacji i hamuje przetwarzanie nieważnych informacji. Chociaż razem (uwaga i predykcja) służą percepcji, to rzadko rozpatrywane są łącznie.

#### **3.1. Relacja między przewidywalnością a uwagą**

Choć definicje predykcji i uwagi różnią się, to oba mechanizmy mają na celu zwiększenie efektywności neuronalnej. Energia pracy neuronów ma bowiem w pierwszej kolejności służyć przesyłowi informacji o nowych, nieoczekiwanych zdarzeniach, które w istotny sposób mogą wpłynąć na uaktualnienie i doprecyzować bieżącą reprezentację rzeczywistości (Grotheer i Kovács, 2016). Jak to się ma do teorii uwagi selektywnej, zgodnie z którymi przewidywalność prowadzi do wzmocnienia reakcji neuronalnej na bodźce mające cechy, na które wyostrzona jest uwaga? W literaturze obserwowany jest brak zgody co do tego, czy to nieprzewidywalne, zaskakujące zdarzenia (Itti i Baldi, 2009; Kaya i Elhilali, 2017), czy też te przewidywalne (Mackintosh, 1975) są najbardziej informatywne dla sceny akustycznej i przez to powinny (Itti i Koch; 2000, 2001; Press i in., 2020) być oznaczane jako wyraziste i przyciągać uwagę selektywną (Dayan i in.,

2000; Esber i Haselgrove, 2011; Pearce i Mackintosh, 2010). Powyższa rozbieżność uczyniła obszar nauki zgłębiający relację pomiędzy przewidywalnością i uwagą silnie eksplorowanym (Bendixen, 2014; Chennu i in., 2013; Feldman i Friston, 2010; Kok i in., 2012; Lange, 2013; Rimmele i in., 2011; Southwell i in., 2017; Summerfield i de Lange, 2014; Summerfield i Egner, 2016).

Kontrowersja dotycząca pytania, czy wzmocnienie reakcji neuronalnej dotyczący bodźców przewidywalnych, czy nieprzewidywalnych, doczekała się wielu propozycji rozstrzygnięcia. Jedno z rozwiązań oferuje TKP, w świetle której uwaga jest sformalizowana jako proces, którego zadaniem jest wnioskowanie o poziomie prawdopodobieństwa bodźca (Heilbron i Chait, 2018). Choć modele TKP różnią się w detalach (Feldman i Friston, 2010; Rao, 2005; Spratling, 2008a, b, 2010), to wszystkie konceptualizują uwagę jako ważenie sygnałów sensorycznych przez ich precyzję (tzn. ich odwrotną wariancję). Mózg przez to nie tylko generuje (pierwszorzędowe, ang. *first-order*) predykcje o treści sygnału, ale także (drugorzędowe, ang. *second-order*) estymacje o jego rzetelności (ang. *reliability*). Kiedy rzetelność jest niska, odchyleniom od normy przypisywana jest niska waga znaczeniowa i mogą zostać niezauważone. Kiedy jednak rzetelność jest wysoka, to odchylenia są wzmacniane i priorytetyzowane do dalszego przetwarzania. Zgodnie z uwagą rozumianą jako precyzja predykcji (Barascud i in., 2016; Heilbron i Chait, 2018), sygnał zgodny z predykcją staje się wzmocniony przez uwagę i w ten sposób pozytywnie weryfikuje trafność predykcji (Friston, 2009; Hesselmann i in., 2010; Rao i Ballard, 2005). Innymi słowy: gdy ważność bodźca dla zadania jest wysoka, dane wejściowe mogą zdominować wnioskowanie, natomiast gdy niska, wówczas w tym wnioskowaniu dominują przewidywania. Mało ważne zdarzenia traktowane są wtedy jako obserwacje odstające (ang. *outliers*; Filipowicz i in., 2018; Heilbron i Chait, 2018).

Powyższa obserwacja niesie poważne implikacje dotyczące relacji między wskazówką a zadaniem – w szczególności stopnia informatywności i ważności wskazówki dla wykonania zadania (Chica i in., 2014; Hayward i Ristic, 2013). Jeśli zatem wskazówka jest ważna (tj. w pewnym stopniu użyteczna), to uwaga może wzmacniać reakcje na bodźce przewidywalne ze względu na wzrastającą rzetelność sygnału. Efekt ten został potwierdzony w badaniach fMRI (Kok i in., 2012). Powyższe obserwacje wiążą się nieodłącznie z zagadnieniem optymalizacji bayesowskiej, które dotyczy ważenia błędów na podstawie ich rzetelności, zazwyczaj obliczanej jako niepewność predykcji względem

obserwacji (Yu i Dayan, 2005a). Miara ta wyrażana jest współczynnikiem zwanym nagrodą Kalmana (ang. *Kalman gain*) (Anderson i Moore, 1979; Kalman, 1960). Kiedy zysk (precyzja) jest wysoki/a, to sygnały wejściowe są ważone wyżej i będą dominować we wnioskowaniu; kiedy natomiast precyzja jest niska, to sygnały wejściowe są ważone niżej i to predykcje zdominują wnioskowanie.

Wielu autorów zajmujących się obszarem TKP (Feldman i Friston, 2010; Rao, 2005; Spratling, 2008a, b, 2010) używało przedstawionego powyżej podejścia optymalnego radzenia sobie z niepewnością w zagadnieniach związanych z uwagą, ponieważ oferuje ono normatywne zasady, które mogą wyjaśniać selektywne przetwarzanie, jednocześnie motywując, dlaczego pewne sygnały są obliczeniowo bardziej istotne niż inne. Przykładem teorii uwagi słuchowej uwzględniającej w mapach wyrazistości obok wniosków płynących z TKP także statystyki bayesowskie jest propozycja Kaya i Elhilali (2014). Zaktualizowaną wersję tej koncepcji przedstawili niedawno Press i in. (2020), którzy podsumowują dotychczasowe teorie wyjaśniające relację między przewidywalnością a uwagą i dzielą je na dwie grupy: teorie bayesowskie (ang. *bayesian theories*) oraz teorie anulacji (ang. *cancellation theories*). Teorie bayesowskie proponują, że percepcja jest ukierunkowana na to, czego się spodziewamy – a zatem jest bardziej prawdopodobne, że percepcja zwiększa zysk dla jednostek oczekiwanych w stosunku do nieoczekiwanych (optymalizacja prawdziwości; Yu i Dayan, 2005a, 2005b). Matryce o wyższym kontraście odzwierciedlają silniejsze reprezentacje sensoryczne (wysoki stosunek sygnału do szumu; ang. *signal-to-noise ratio*, SNR; Briggs i in., 2013; Press i in., 2020). Teorie anulacji z kolei proponują, że ograniczone zasoby naszych systemów percepcyjnych są poświęcone nieoczekiwanym sygnałom, które mogą wymagać od nas uaktualnienia przekonań i wykonania działań korygujących poprzez tłumienie – a nie zwiększanie – oczekiwanej aktywności sensorycznej (optymalizacja informatywności; Friston, 2010; Press i in., 2020). Teorie anulacji są w konflikcie z teoriami bayesowskimi. Press i in. (2020) proponują teorię przeciwstawnych procesów pozwalających pogodzić powyższe obserwacje. Zakłada ona, że percepcja jest początkowo ukierunkowana na to, co oczekiwane, aby wspomóc szybkie generowanie w dużej mierze prawdziwych doświadczeń. Kiedy dane wejściowe są wystarczająco zgodne z oczekiwaniami, tak że wszelkie odchylenia można prawdopodobnie przypisać szumowi sensorycznemu, nie działają żadne inne procesy. Jeśli jednak dane wejściowe różnią się od przewidywań na tyle, że wywołują duże

zaskoczenie, zwiększona zostaje percepcja tych zaskakujących danych wejściowych, wspomagając w ten sposób uczenie się.

Modele uczenia się często skupiają się na koncepcji „zaskoczenia” (ang. *surprise*), rozwijając formalne opisy stopnia, w jakim zdarzenie jest nieoczekiwane. Jednym ze sposobów operacjonalizacji zaskoczenia jest rozbieżność Kullbacka-Leiblera (ang. *Kullback-Leibler discrepancy*, KLD). To wielkość, która ujmuje zmianę pomiędzy przekonaniami o stanach środowiska przed i po przetworzeniu danego dowodu zmysłowego. Co ważne, tak zoperacjonalizowane zaskoczenie odzwierciedla zarówno odchylenie między wartością modalną a priori i a posteriori, jak i precyzję (odwrotnie związaną ze zmiennością) tych reprezentacji. Innymi słowy, KLD konceptualizuje stopień nakładania się rozkładów apriorycznych i aposteriorycznych. Gdy zaskoczenie jest wysokie (lub nakładanie się jest niskie), organizm powinien się uczyć (Itti i Baldi, 2009). KLD oddaje więc intuicję, że nie można być bardzo zaskoczonym, gdy nie miało się na początku silnych oczekiwań, ani nie można być zaskoczonym przez jakieś zdarzenie, jeśli nie jest się pewnym, że rzeczywiście miało miejsce.

Fizjologicznie uważa się, że relacja między predykcją a uwagą odbywa się za pośrednictwem postsynaptycznego wzmocnienia neuronów powierzchniowych (błędy predykcji) dostrojonych (ang. *tuned*) do wymiaru, na który jest zwracana uwaga (ang. *attended*) (np. uwaga oparta o cechę, uwaga przestrzenna, uwaga temporalna). Predykcja odnosi się do przewidywań wysyłanych w dół z modeli predykcyjnych umieszczonych na wyższych poziomach hierarchii przetwarzania do niższych poziomów, a uwaga odnosi się do modulacji wzmocnienia sygnału błędu predykcji wysyłanego do wyższego poziomu. Ponieważ przewidywania kodują treść i pewność (poziom ufności, ang. *confidence*) danych sensorycznych, a wzmocnienie może być modulowane przez intencję słuchacza i przewidywalność danych wejściowych, można rozwinąć różne możliwości interakcji między uwagą a przewidywaniem. Z tej perspektywy tradycyjne rozróżnienie pomiędzy uwagą kierowaną oddolnie i odgórnie może zostać zrewidowane, a zagadnienie doświadczenia jako trzeciego czynnika ukierunkowującego ją może te ramy integrować.

Przewidywalność w zakresie modalności słuchowej i prostej oraz złożonej sceny akustycznej była manipulowana za pomocą różnych cech bodźca, w tym częstotliwości, intensywności, lokalizacji, czasu i pewnych ich kombinacji. Chociaż różne cechy często



traktowane były jako w pewnym sensie zamienne (Kitterick i in., 2010), aby zademonstrować ogólną zasadę efektów przewidywalności, ich specyficzne efekty powinny zostać rozdzielone w przyszłych badaniach. Są one uważane za jakościowo odmienne w teoretycznych ramach przetwarzania słuchowego. Näätänen i Picton (1987) zaproponowali terminy niepewność czasowa i niepewność zdarzenia, aby podkreślić jakościową różnicę między regularnościami czasowymi (odzwierciedlającymi aspekt *kiedy*) i regularnościami cech (odzwierciedlającymi aspekt *co*). Lokalizacja, odzwierciedlająca aspekt *gdzie*, może stanowić jeszcze jedną jakościowo odmienną cechę (Rauschecker i Tian, 2000; Schwartz i Shinn-Cunningham, 2010).

Aspekty: *co*, *gdzie* i *kiedy*, w kontekście przewidywalności, jak i uwagi, charakteryzują się zróżnicowaniem zarówno wewnątrzmodalnym (ang. *within-modality*), jak i międzymodalnym (ang. *cross-modality*). W przypadku zróżnicowania międzymodalnego zaobserwować można, że przestrzenna orientacja odgrywa ograniczoną rolę w uwadze słuchowej, natomiast temporalna orientacja jest kluczowa i centralna – w porównaniu do wzrokowej (Emberson i in., 2011). Różnice te dotyczą zarówno ukierunkowania uwagi za pomocą celu (procesy odgórne), wyrazistości bodźców (procesy oddolne), a ostatnie badania wskazują, że także w zakresie doświadczenia. Dla przykładu, uczenie się prawdopodobieństwa lokalizacji cechuje się mniejszym efektem w zadaniach słuchowych w porównaniu do wzrokowych (Addleman i Jiang, 2019b; Rimmele i in., 2011). Z kolei w przypadku wizualnego prymowania lokalizacji efekt występuje nawet wtedy, gdy nieprzestrzenne cechy (np. kształt) zmieniają się (Maljkovic i Nakayama, 1996). Prymowanie lokalizacji w domenie słuchowej jest mniej odporne i często nie występuje, gdy nieprzestrzenne cechy zmieniają się podczas kolejnych prób (Addleman i Jiang, 2019b; Dyson, 2010). Na poziomie zróżnicowania wewnątrzmodalnego wystąpienie efektów przewidywalności w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo-przestrzennym może zależeć jednak od dodatkowych czynników sugerowanych przez literaturę, do których zaliczyć można: wzrost trudności zadania, złożoności sceny akustycznej czy zmianę natury wskazówki pozwalającej na wytworzenie predykcji (Lewald i Getzmann, 2015; Rimmele i in., 2011). Zostaną one omówione w dalszej części opracowania.

### 3.2. Badania własne

Addleman i Jiang (2019a) zaproponowali wyjście poza dychotomię procesów oddolnych i odgórnych, wprowadzając do zagadnień związanych z uwagą pojęcie doświadczenia. Doświadczenie budowane jest przez asocjacyjne uczenie się, uczenie w oparciu o nagrodę lub historię wyboru. Ta ostatnia opisywana jest jako kształtowana przez ogólnie zdobytą wiedzę statystyczną na podstawie efektów długo lub krótkotrwałych. Zagadnienie uczenia się statystycznego i związanego z nim nabywania zdolności predykcji zgłębiane jest od lat, także w przypadku relacji z uwagą słuchową. Literatura dostarcza niejednoznacznych wyników dotyczących odmiennej roli i ważności przewidywalności czasowej, przestrzennej i czasowo-przestrzennej w orientacji uwagi słuchowej (Emberson i in., 2011; Lange, 2013; Nobre i in., 2007; Rimmele i in., 2011). Opisywane wyniki często dotyczą różnych środowisk, nie tylko natury statystycznej (zasada częstości lub kolejności), akustycznej (prosta lub złożona scena akustyczna), ale także rodzaju zadania wpływającego w zróżnicowany sposób na kolejne etapy przetwarzania. Zarówno zespół Töllnera i in. (2012), jak i Schrögera i in. (2015) zwracają uwagę, że powyższe czynniki są niezwykle istotne dla interpretacji wyników.

Głównym celem projektu jest odpowiedź na pytania:

- (1) Czy przewidywalna częstość i kolejność pojawiania się bodźców w wymiarze czasowym, przestrzennym i czasowo-przestrzennym pozwala na facylitację procesu orientacji uwagi w zadaniu dyskryminacji w sytuacji prostej i złożonej sceny akustycznej?
- (2) Jaka aktywność neuronalna towarzyszy tej facylitacji?

Przegląd literatury w poszukiwaniu odpowiedzi na powyższe pytania dostarcza zróżnicowanych, często wzajemnie sprzecznych obserwacji. Wydaje się prawdopodobne, że sprzeczność ta może być wynikiem użycia odmiennych paradygmatów w poszczególnych badaniach, a także wiązać się z niskim poziomem kontroli zmiennych mających wpływ na przetwarzanie sceny akustycznej. Istota odmiennych efektów obserwowanych w literaturze może leżeć także w sposobie organizacji statystycznej bodźców, a więc w naturze samej przewidywalności – stąd też przypuszczalny efekt facylitacji zostanie zweryfikowany odrębnie dla przewidywalności uczonej na podstawie zasady częstości i dla efektu uczenia się na podstawie zasady kolejności. Uwzględnione zostaną także dwa klasyczne środowiska akustyczne: prosta i złożona scena akustyczna.

Badania wskazują na różną dystrybucję i stopień zaangażowania procesów poznawczych towarzyszący przetwarzaniu obu tych scen. W konsekwencji możliwe do utworzenia są cztery warianty eksperymentalne: prosta scena akustyczna z wyodrębnioną zasadą częstości lub kolejności oraz złożona scena akustyczna – także z podziałem na rodzaj uczenia statystycznego (częstość lub kolejność). W dalszej części opracowania zaprezentowany zostanie szczegółowy przegląd dotyczący badań behawioralnych, a także neurofizjologicznych, łączących zagadnienia relacji między przewidywalnością a uwagą słuchową z opisaną powyżej organizacją statystyczną bodźców, a także przedstawionymi typami sceny akustycznej.

### **3.2.1. Prosta scena akustyczna: zasada częstości**

Badania dotyczące probabilistycznej zasady uczenia się dla modalności słuchowej w przypadku prostej sceny akustycznej często wiązały się z jawnym ukierunkowaniem uwagi za pomocą wskazówki symbolicznej (Lange, 2013; Schröger i in., 2015). Jednocześnie w większości badań podejmowano zagadnienie przewidywalności czasowej i przestrzennej rozdzielnie. Część z nich odwoływała się wyłącznie do efektów facylitacji na poziomie behawioralnym, jak w przypadku Spence i Driver (1996), którzy zaobserwowali szybsze czasy reakcji na bodziec w blokach przewidywalnych przestrzennie w porównaniu do nieprzewidywalnych. Wśród autorów podejmujących problematykę przewidywalności czasowej zaobserwować można rozbieżności w uzyskiwanych efektach – szczególnie na poziomie potencjału N1. Lange (2013) sugeruje, że kiedy oczekiwania są używane, by manipulować uwagą, prowadzi to jednocześnie do orientacji uwagi, jak i do generowania precyzyjnych predykcji o nadchodzącym zdarzeniu (ang. *event*). W świetle modelu addytywnego uwaga i predykcja posiadają przeciwny wpływ na wczesne etapy przetwarzania słuchowego. Precyzyjniej: uwaga temporalna powinna zwiększać, a predykcje temporalne zmniejszać amplitudę słuchowego potencjału N1. Kierowanie wskazówką przede wszystkim manipuluje prawdopodobieństwem bodźca i stąd – oczekiwaniami uczestników badania. Jednak oczekiwania mogą także wywierać większy wpływ na przetwarzanie bodźca w porównaniu do tego wywołanego przez ukierunkowanie uwagi (Rauss i in., 2012).

W przeciwieństwie do uwagi, przewidywalność bodźca jest powiązana z redukcją wczesnych potencjałów o negatywnej amplitudzie. Chociaż kierowanie wskazówką probabilistyczną jest typowo związane z manipulacją uwagą (Mangun i Hillyard, 1991),

to badania z użyciem tego paradygmatu nie mogą być jednoznacznie zaklasyfikowane z odniesieniem do dychotomii między uwagą a przewidywalnością. Z jednej strony bowiem bodźce kierowane i niekierowane wskazówką występują z różnym prawdopodobieństwem, tj. w tych badaniach manipuluje się prawdopodobieństwem bodźców. Z drugiej strony, w typowym zadaniu zawierającym wskazówkę probabilistyczną, wszystkie bodźce wymagają jawnej odpowiedzi (ang. *overt response*). Stąd też jest wysoko adaptacyjne, by kierować uwagę na najbardziej prawdopodobne (a stąd też oczekiwane) zdarzenie: prowadzić to będzie do najwyższego wykonania (ang. *highest performance*). Można więc przyjąć, że zadanie zawierające wskazówkę probabilistyczną wprowadza interakcję między uwagą a oczekiwaniami/predykcją (Kok i in., 2012; Rauss i in., 2012; Summerfield i Egner, 2009).

Mimo tej konfuzji, wyniki pomiaru potencjałów w paradygmacie kierowania wskazówką probabilistyczną są podobne do tych uzyskiwanych w paradygmacie filtra (Mangun i Hillyard, 1991; Schröger, 1993, 1994; Schröger i Eimer, 1997), które wiążą się ściśle z uwagą odseparowaną od przewidywalności. Dla przykładu Schröger (1993) zaraportował pojawienie się komponentu N1 związanego z uwagą słuchową przy użyciu zarówno czystego zadania filtra, jak i interakcji filtra ze wskazówką probabilistyczną. Zakładając, że wskazówka probabilistyczna wywołuje zarówno wzrost w przewidywalności bodźca, jak i orientację uwagi, oraz zakładając addytywny wpływ obu efektów tych procesów na amplitudę N1, uzyskany efekt ERP może sugerować, że zwiększenie amplitudy N1 związane z uwagą (ang. *attention-related enhancement*) przeważało (ang. *outweighed*) redukcję wywołaną przez przewidywalność bodźca. Stąd też kierunek efektu wskazówki probabilistycznej na wielkość rejestrowanych potencjałów może zależeć od różnych czynników, które przyczyniają się do orientacji uwagi z jednej strony i do przewidywalności zdarzeń z drugiej.

Addytywność uwagi i predykcji nie jest jedyną możliwością wyjaśnienia powyższych obserwacji (co częściowo podkreślone zostało w poprzednim rozdziale). Wzrost amplitudy potencjałów mózgowych w odpowiedzi na bodziec zaangażowany uwagą (ang. *attended*) znajduje teoretyczne i empiryczne uzasadnienie w koncepcji proponującej synergistyczny efekt uwagi i predykcji w zadaniach ze wskazówką probabilistyczną. Uwaga uważana jest za napędzającą (ang. *boost*) precyzję predykcji, co prowadzi do zwiększonej wagi dowodów zmysłowych (Feldman i Friston, 2010). Skutkuje to efektem przeciwnym do wywoływanego przez predykcję procesu wyciszania

sensorycznego (ang. *sensory silencing*) i stąd też prowadzi do wzrostu amplitudy potencjałów mózgowych w odpowiedzi na bodziec, który jest uwagowo ważny (ang. *attended*) w zadaniu zawierającym wskazówkę probabilistyczną (Kok i in., 2012). Innymi słowy – jeśli dostępne są informacje pozwalające precyzować predykcje, uwaga nadaje im wysokie wagi. Wskazówka dotycząca przewidywalności, przynajmniej częściowo informatywna w stosunku do zadania, może zatem być wykorzystana do redukcji wariacji w zakresie przewidywań, natomiast z powodu braku całkowitej pewności co do zdarzeń mogących zachodzić w przyszłości obserwowane jest wzmocnienie amplitudy N1 (zamiast hamowania). Przeciwnie – w sytuacji, w której wskazówka probabilistyczna nie jest lub przestaje być informatywna (ważna dla efektywnego wykonania zadania) lub z powodu organizacji statystycznej pozwala w pełni przewidywać konkretny bodziec, zaobserwować można hamowanie komponentu N1 z powodu niskich wag przypisanych tym informacjom.

Powyższy model został z powodzeniem zastosowany do wyjaśnienia wzrostu amplitudy potencjałów mózgowych obserwowanych dla przestrzennej wskazówki probabilistycznej w domenie wizualnej (Mangun i Hillyard, 1991), a co więcej – predykcje tego modelu zostały skorelowane z wynikami badań fMRI w domenie słuchowej (Kok i in., 2012). Równoległe teoria przeciwnych procesów Press i in. (2020) proponuje nadanie temporalnej charakterystyki omawianych powyżej propozycji relacji między predykcją a uwagą. W pierwszej kolejności wzmacniane są sygnały ważne dla zadania. Sygnałami ważnymi są więc na tym etapie „przyszłe” bodźce przewidywalne. Bodźce te określane są mianem zaskakujących (ang. *surprising*). Jeśli krok pierwszy może zostać ukończony, tj. zredukowano w dostateczny sposób wariację błędu, to możliwy jest kolejny etap, w którym bodźcami zaskakującymi mogą stać się bodźce odstające od modelu predykcyjnego (zwane bodźcami rzadkimi lub obserwacjami odstającymi; ang. *outliers*). Jest to równoznaczne z faktem, że bodźce przewidywalne (np. częstsze niż pozostałe) przestają być zaskakujące. Wydaje się prawdopodobne, że informatywność, ważność czy użyteczność wskazówki dla wykonania ściśle określonego zadania są zatem czynnikami kluczowymi dla wyjaśnienia rozbieżności w obserwowanych efektach na poziomie elektrofizjologicznym. Gwarantuje to bowiem sprawne przejście od jednego etapu do drugiego. Jeśli etap pierwszy nie zostaje ukończony, obserwowany jest np. wzrost amplitudy komponentu N1. Jeśli natomiast zostaje ukończony, następuje redukcja N1 związana z etapem drugim.

Zagadnienie mimowolnie wyuczonej przewidywalności przestrzennej, a także czasowo-przestrzennej, związanej z równoległą manipulacją wymiarem czasowym i przestrzennym, podjęte zostało przez zespół Rimmele i in. (2011). Inspirując się badaniem zespołu Doherty i in. (2005), podjęli próbę zaprojektowania eksperymentu tak, by osoby badane mogły wyuczyć się przewidywalności dzięki doświadczeniu zdobytemu w oparciu o wcześniejsze próby. Na podstawie braku lub obecności przewidywalności w wymiarze przestrzennym (ang. *spatial*, S) lub czasowym (ang. *temporal*, T) utworzono cztery bloki eksperymentalne: S<sup>+</sup>T<sup>+</sup>, S<sup>+</sup>T<sup>-</sup>, S<sup>-</sup>T<sup>+</sup>, S<sup>-</sup>T<sup>-</sup>. W przeprowadzonym badaniu przyjęto, że osoby badane będą wyuczać się regularności w oparciu o pozorny ruch dźwięku w wymiarze czasowym lub przestrzennym wywołany za pomocą szybkiej prezentacji kolejnych prób. To jednak tylko jedna z opcji, ponieważ drugim sposobem zdobycia wiedzy na temat przewidywalności była możliwość wyuczenia się przewidywalnej częstości lub kolejności pojawiających się dźwięków, czego w eksperymencie nie kontrolowano. Przyjęcie tego typu perspektywy może pozwolić wyjaśnić zaobserwowane efekty. W opisywanym badaniu główny efekt przewidywalności dotyczył przede wszystkim wymiaru czasowego (w porównaniu do braku przewidywalności) – zarówno na poziomie behawioralnym (czasy reakcji), jak i amplitudy mierzonych potencjałów: P1 (dla szczytu amplitudy), N1 i N2. Nie wystąpił natomiast efekt główny wymiaru przestrzennego – miał on swój udział jedynie w przypadku interakcji wymiarów czas-przestrzeń w przypadku późnego komponentu P3. Efekt ten został zinterpretowany jako integracja informacji płynących z obu wymiarów przewidywalności: czasowej i przestrzennej. P3 ma jednak długą historię badań. Lange (2003) proponowała, że wzrost komponentu P3 może być dodatnio związany z ilością informacji dostarczanej przez wskazówkę. Z kolei alternatywnym wyjaśnieniem zmiany w amplitudzie tego komponentu może być także hamowanie motoryczne (ang. *motor inhibition*; Hughes i in., 2013). Im silniejsza możliwość wytworzenia przewidywalnych, a więc oczekiwanych bodźców w określonym wymiarze dotyczącym określonej sytuacji, tym trudniej wyhamowywać reakcję, gdy wystąpi sytuacja alternatywna (Lange, 2012). Chennu i in. (2013) proponują, że amplituda P3 zależna jest od zaangażowania uwagowego i odgórnych oczekiwań. Wreszcie, Kopp i in. (2016) sugerują, że wielkość amplitudy P3 zależna jest od prawdopodobieństwa a priori, tak że występuje między nimi dodatnia korelacja.

W przypadku późnego komponentu P3 także zaobserwowano szereg różnych efektów związanych z przewidywalnością bodźców. Lange (2010) zaobserwowała

wzmocnienie komponentu P3 w przypadku bodźców przewidywalnych czasowo (można było w stosunku do nich wytworzyć predykcje). Odnotowano to zarówno w badaniach wykorzystujących sekwencje bodźców w celu wywołania orientacji czasowej (Correa i Nobre, 2008; Lange, 2009), jak i w badaniach nad dobrowolną orientacją czasową (Correa i in., 2006; Griffin i in., 2002, Miniussi i in., 1999, Sanders i Astheimer, 2008). Wzmocnienie potencjału P3 było interpretowane jako wskaźnik procesów związanych z wykrywaniem celu lub przygotowaniem odpowiedzi wywołanych przewidywalnością czasową (Miniussi i in., 1999, Sanders i Astheimer, 2008). Król i El-Deredy (2015) zwracają uwagę, że zwiększenie lub zmniejszenie amplitudy P3 zależne jest od rodzaju zadania. Wpływ oczekiwań na amplitudę P3 może być bezpośredni lub pośredni. W przypadku efektu bezpośredniego dowody sugerują, że najprawdopodobniej tylko nieświadome, automatyczne szacowanie prawdopodobieństwa bodźca znajduje odzwierciedlenie w wielkości amplitudy P3. Jednakże aktywne, świadome oczekiwania mogą wpływać na potencjał P3 na drodze pośredniej, poprzez wpływ na znaczenie bodźca, doprowadzenie do zamknięcia epoki percepcyjnej lub zmianę poziomu trudności przetwarzania. Taki pośredni efekt oczekiwań może mieć przeciwny kierunek niż efekt automatycznie tworzonych oczekiwań – to znaczy, że w odpowiedzi na oczekiwane bodźce może być generowany potencjał P3 o większej amplitudzie.

Brak efektu przestrzennego w eksperymencie Rimmele i in. (2011) tłumaczony był w oparciu o różnice między modalnością wizualną a słuchową – tj. ważniejszy udział wskazówki temporalnej i mała rola przestrzennej w przypadku słuchu (i na odwrót w przypadku wzroku). Z perspektywy natury modalności słuchowej, a także wiedzy o własnościach statystycznych prezentowanych bodźców, można jednak znaleźć szereg czynników, które mogły znosić efekt wskazówki przestrzennej – bez wyjaśnienia których nie sposób przypisać brak efektu kwestii wyłącznie natury modalnościowej. Wśród nich znajduje się: liczba elementów budujących sekwencję, niewielka odległość kątowa pomiędzy bodźcami czy powolność binauralna mechanizmu słuchu u człowieka (Gilkey i Anderson, 2014; Ihlefeld i Shinn-Cunningham, 2008; Sach i in., 2000). Odpowiednia długość sekwencji daje możliwość wyuczenia się zasady, jednak im dłuższa jest sekwencja, tym trudniejsza do wyuczenia (Daltrozzo i Conway, 2014). W przypadku badań Rimmele i in. (2011) sekwencja utworzona była przez szereg dwunastu następujących po sobie lokalizacji (wliczając maskę i cel, było ich czternaście), co mogło utrudniać zrozumienie reguły. Co więcej, ze względu na stosunkowo proste zadanie, wskazówka przestrzenna

mogła nie być użyteczna w kontekście jego wykonania. Mogło to skutkować brakiem zaangażowania głębszych etapów przetwarzania proponowanych przez Töllnera i in. (2012) czy Eimera (2014). Inne kryterium stanowiła natura środowiska akustycznego, w którym odbywało się badanie. Dźwięki prezentowane były na słuchawkach, co według niektórych badaczy powoduje wrażenie, że dźwięk tworzony jest wewnątrz (pośrodku) głowy (tj. nie ma takiej reprezentacji/rozdzielczości przestrzennej, jak dźwięki odtwarzane z pasywnych głośników rozmieszczonych w otoczeniu; Moore, 2013). Rimmele i in. (2011) zaproponowali, że być może zadanie trudniejsze percepcyjnie będzie angażowało użycie wskazówki przestrzennej w większym stopniu. Stało się to powodem użycia zadania dyskryminacji (zamiast go/no-go) w każdym z prezentowanych eksperymentów.

### **3.2.2. Prosta scena akustyczna: zasada kolejności**

Zasada kolejności jest drugim typem organizacji statystycznej rzeczywistości. W przypadku badań dotyczących sekwencyjnych regularności w domenie słuchowej, zaobserwowano efekty związane z wpływem przewidywalności na orientację uwagi słuchowej – zarówno na poziomie behawioralnym, jak i elektrofizjologicznym. Kierunek wspomnianych efektów okazał się być zróżnicowany dla różnych ustawień eksperymentalnych. W przypadku przewidywalności dotyczącej wymiaru czasowego zaobserwowano zarówno redukcję amplitudy komponentu N1 w dwóch eksperymentach Lange (2009), jak i wzrost N1 w późniejszych badaniach Lange (2010) i Rimmele i in. (2011). W przypadku wcześniejszego badania Lange (2009) szybsze odpowiedzi obserwowano dla przewidywalnego w porównaniu do nieprzewidywalnego warunku (podobnie do badania wzrokowego przeprowadzonego przez Doherty i in., 2005). Analiza danych elektrofizjologicznych wykazała, że trafne oczekiwania temporalne cechowały się tłumieniem amplitudy komponentu N1 w porównaniu do warunków, gdzie nie było wywołanych żadnych oczekiwań (Rimmele i in., 2011 uzyskali wzmocnienie N1 dla podobnej manipulacji). Co kluczowe, jako że warunek z możliwością wytworzenia oczekiwań był porównywany do warunku bez żadnych oczekiwań, to obserwowany efekt może być rozdzielony względem rodziny odpowiedzi na bodźce niezgodne z oczekiwaniami (typu mismatch; Schröger, 1998). Dodatkowo, spójnie z poprzednimi badaniami nad rytmiczną wskazówką (Doherty i in., 2005), oczekiwania temporalne zwiększyły także komponent P3 (Correa i Nobre, 2008; Rohenkohl i Nobre, 2011).

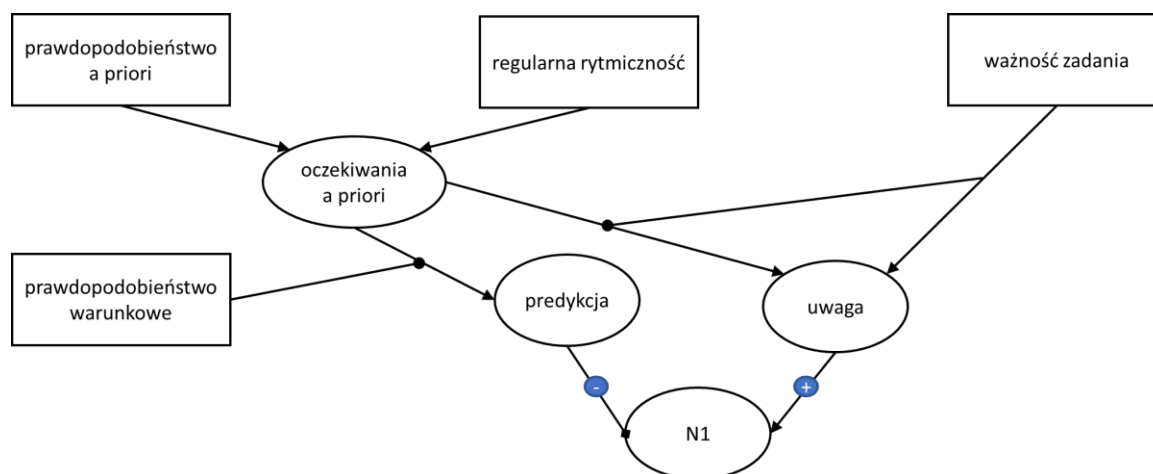


Jedną z propozycji wyjaśnienia efektu zaobserwowanego w badaniu Lange (2009) wiąże redukcję N1 ze wzrostem przewidywalności bodźca w warunkach rytmicznych w porównaniu do arytmicznych. Przewidywalność sensoryczna jest kojarzona z malejącą amplitudą N1 (Clementz i in., 2002; Schafer i in., 1981). U Lange (2009) wysoka częstość prezentacji jednego z interwałów spowodowała wzrost przewidywalności, co częściowo związane było także z wysoką precyzją sygnału. W przeciwieństwie do powyższego efektu, w badaniach dotyczących orientacji uwagi temporalnej w wyniku manipulacji ważnością zadania, punkt czasowy prezentacji celu nie jest przewidywalny na początku prób (Lange i Röder, 2010), co wiązało się ze wzrostem N1. Powyższe obserwacje można zatem przypisać różnicom w zakresie temporalnej przewidywalności.

Dalsze badania prowadzone przez Lange (2010) potwierdziły, że obserwowane w poprzednim badaniu zmniejszenie N1 może być związane z rosnącą przewidywalnością w warunkach rytmicznych. Korzystając z podobnego paradygmatu, prezentowano regularne i nieregularne sekwencje przed tonem będącym celem. Nowy układ badania zaproponowany przez Lange (2010) zawierał także przedwczesne lub spóźnione cele w porównaniu do punktu czasowego wyznaczonego przez rytmiczność sekwencji. Stąd też sekwencje nie były do końca rzetelne – nie można było ich wykorzystywać do pełnej predykcji czasu pojawienia się celu u Lange (2009). W szczególności, N1 na rytmicznie zaangażowane uwagę bodźce nie było hamowane w warunkach regularnym w porównaniu do nieregularnego, co jest spójne z obserwacją, że hamowanie N1 obserwowane w poprzednich badaniach było związane z procesami temporalnej predykcji (Lange, 2009).

Prezentowanie powtarzalnych sekwencji uruchamia dwa procesy z przeciwnym wpływem na przetwarzanie bodźca: pierwszy jest podobny do procesów zaangażowanych podczas stosowania paradygmatu ważności zadania (ang. *task-relevance*) – wywoływana jest wtedy orientacja uwagi powiązana ze wzrostem N1. Ten proces dominuje, gdy prawdopodobny czas pojawienia się celu jest niepewny z powodu zredukowanego prawdopodobieństwa a priori i/lub zredukowanego prawdopodobieństwa warunkowego. Z kolei drugi proces jest związany ze wzrostem przewidywalności pojawienia się bodźca w warunkach rytmicznych i prowadzi do redukcji N1. Ten proces może mieć dominujący wpływ na amplitudę N1, gdy sekwencja w sposób rzetelny jest używana do przewidywania pojawienia się bodźca – zarówno z powodu stałego prawdopodobieństwa a priori (Lange, 2009), jak i z powodu wzrostu prawdopodobieństwa warunkowego (rys. 7). Pozostaje to w zgodzie z ostatnim badaniem Press i in. (2020), w świetle którego

w pierwszej kolejności wzmacniana jest reakcja na bodźce przewidywalne, co prowadzi do wzrostu komponentu N1. Drugi etap w sytuacji wzrastającej rzetelności predykcji skutkuje z kolei redukcją N1.



Rysunek 7. Mechanizm wpływu przewidywalności i uwagi na amplitudę komponentu N1 [opracowanie własne na podstawie: Lange (2013)]

Lange (2013) sugeruje, że rozbieżność znaleziona dla wczesnych, sensorycznych efektów nie jest związana z wymiarem bodźca. Efekt może dotyczyć zarówno wymiaru czasowego, jak i przestrzennego – chociaż precyzyjna rola modalności wciąż powinna być eksplorowana. Obok wczesnego komponentu N1, w wyniku reakcji elektrofizjologicznej aktywowany jest także późny komponent P3 związany z procesami decyzji lub odpowiedzi. Badania nad przewidywalnością i uwagą w zakresie wskazówek dotyczących najbardziej prawdopodobnego czasu pojawienia się bodźca wykazują wzmocnienie komponentu P3 dla bodźców prawidłowo wskazanych i oczekiwanych (Griffin i in., 2001; Lampar i Lange, 2011; 2002; Miniussi i in., 1999). Wzrost amplitudy P3 zaobserwowany został także dla przewidywalności w wymiarze czasowo-przestrzennym (Rimmele i in., 2011). Podsumowując, potencjały N1 i P3 wydają się pozostawać pod silnym wpływem zarówno przewidywalności, jak i uwagi. Obecnie oferowane są ramy wyjaśniające odmienne, często sprzeczne wyniki w zakresie amplitudy wspomnianych komponentów. Propozycja uwagi rozumianej jako precyzja predykcji, a także wprowadzenie zagadnienia rzetelności sygnału pozwalają na wykorzystanie informacji o charakterystyce wskazówki do formułowania precyzyjnych (kierunkowych) hipotez.

### 3.2.3. *Złożona scena akustyczna: zasada częstości*

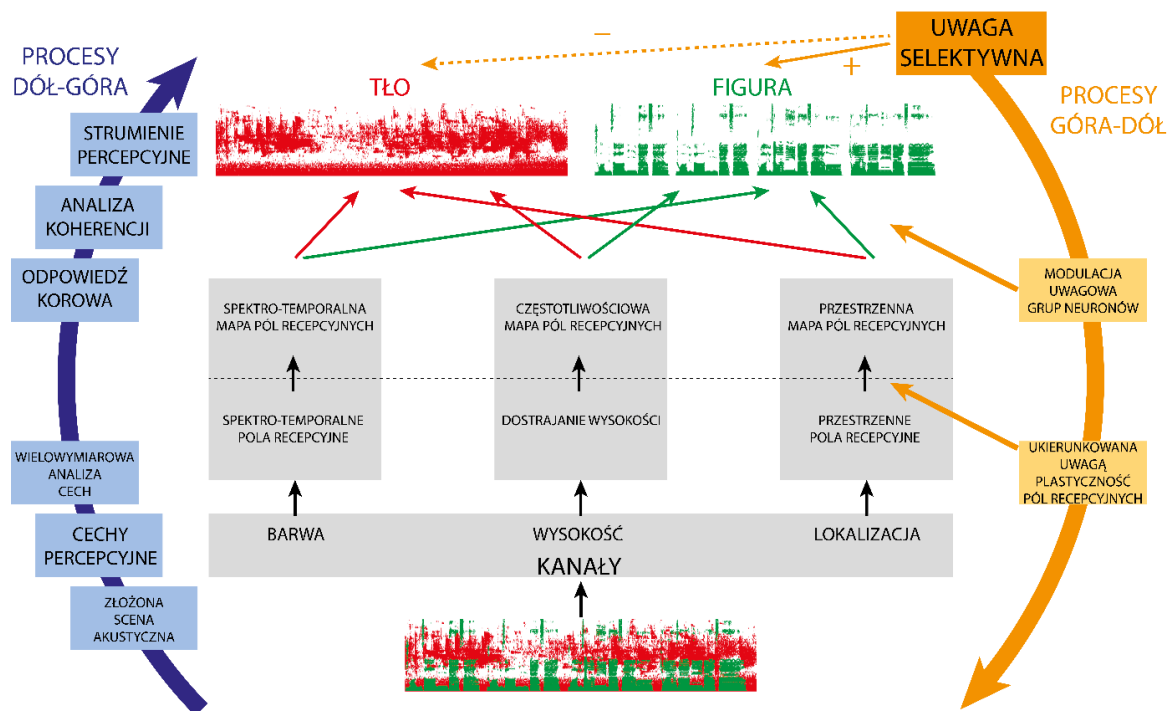
Badania w zakresie złożonej sceny akustycznej w sytuacji wpływu przewidywalności na orientację uwagi słuchowej były dotychczas w dużej mierze przeprowadzane w celu dowiedzenia, czy możliwa jest obserwacja facylitacyjnego wpływu przewidywalności. Były to najczęściej badania o charakterze behawioralnym, które w różny sposób odnosiły się zamiennie do przewidywalności w zakresie cech bodźca oraz czasu i miejsca jego pojawienia się. Dowody na możliwość przeniesienia części wniosków z prostej na złożoną scenę akustyczną stały się pośrednią przesłanką do podjęcia próby weryfikacji przebiegu czasowego procesu z wykorzystaniem wskaźników elektrofizjologicznych w postaci mózgowych potencjałów skorelowanych ze zdarzeniem.

W sytuacji złożonej sceny akustycznej osoba może skoncentrować się na wysłuchaniu i zrozumieniu rozmówcy (proces odgórny) i z łatwością reagować na nieoczekiwany, wyrazisty dźwięk dobiegający z tłumu (proces oddolny). Zdolność ta jest nazywana efektem przyjęcia koktajlowego (ang. *cocktail-party effect*; Cherry, 1953). Informacje dźwiękowe przekazują zarówno czasowe, jak i przestrzenne cechy obiektów. Analiza sceny akustycznej umożliwia systemowi słuchowemu odbieranie i organizowanie informacji dźwiękowych z otoczenia (Bregman, 1994). Selektowna uwaga jest potrzebna, aby wyodrębnić najważniejsze informacje ze złożonego tła i odróżnić je od hałasu (Bregman, 1994; Darwin, 2008). Pomimo wielu przeprowadzonych badań nad naturą selekcji, wciąż istnieje wiele niewyjaśnionych zagadnień (Bronkhorst, 2000; Ebata, 2003; Yost, 1997). Wśród pytań dotyczących analizy sceny akustycznej, na które brakuje nam satysfakcjonującej odpowiedzi, jest pytanie o znaczenie zdolności do skupiania uwagi w oparciu o przewidywalność wzdłuż wymiarów: czasowego, przestrzennego i czasowo-przestrzennego. Aktualne odkrycia na poziomie neuronalnym wskazują, że mechanizm selektywnej uwagi słuchowej występuje w różnych fazach przetwarzania informacji. Ding i Simon (2012) wykazali, że jest on aktywny zarówno w modulacji odgórnej, jak i w oddolnej. Pozwala to osobom badanym wykryć, zlokalizować i selektywnie skupić uwagę na konkretnym źródle dźwięku, nawet w przypadku scen dźwiękowych złożonych z wielu konkurujących ze sobą źródeł.

Jednym z modeli proponujących przetwarzanie złożonej sceny akustycznej jest analiza koherencji. Koncepcja koherencji czasowej oparta jest na pojęciu śledzenia czasowej ewolucji elementów dźwięku (Elhilali, 2017; Shamma i in., 2011). Różne detektory cech mogą być zorganizowane w „mapy”. Należy jednak zauważyć,

że uporządkowana topograficzna reprezentacja cech dźwięku nie jest wymagana do działania ogólnego modelu. Kluczowe jest to, że model zawiera neurony selektywnie reagujące na różne cechy dźwięku lub różne wartości danej cechy. Koherencja czasowa operuje następnie na tych wyjściach neuronalnych, aby związać ze sobą elementy, które kowariancyjnie zmieniają się w czasie, jednocześnie segregując te, które są poza synchronią względem siebie (Krishnan i in., 2014).

Ściśle powiązana z koncepcją koherencji czasowej strategia zakładająca, że proces neuronowy leży u podstaw organizacji złożonej sceny akustycznej to strategia modeli opartych na przewidywaniu lub wnioskowaniu (Winkler i in., 2009). Obliczenia oparte na wnioskowaniu zapewniają ramy dla integracji wszystkich dostępnych wskazówek (np. sensorycznych, kontekstowych, poznawczych) w celu uzyskania prawdopodobnych interpretacji sceny akustycznej. Początkowo proces ten mapuje dane akustyczne na wielowymiarową reprezentację lub na mapy cech. Mapy te parametryzują środowisko akustyczne wzdłuż wymiarów, które reprezentują szacunkowe prawdopodobieństwo określonej dekompozycji sceny akustycznej w oparciu o atrybuty akustyczne. Reprezentacja ta może być dalej zintegrowana z priorytetami, które reprezentują statystyki sensoryczne lub dynamikę cech akustycznych, jak również potencjalne informacje kontekstowe i każdą dodatkową wcześniejszą wiedzę (rys. 8). Dowody te są następnie integrowane przy użyciu optymalnych miar bayesowskich lub alternatywnych strategii w celu wnioskowania o stanie sceny akustycznej i jej strumieni składowych (Friston 2010). Ten proces wnioskowania może przyjmować wiele form. Prawdopodobnie jedna z najbardziej biologicznie wiarygodnych implementacji odwołuje się do Teorii Kodowania Predykcyjnego, które przetwarza informacje sensoryczne w kategoriach predykcyjnych interpretacji podstawowych zdarzeń w scenie (Mumford 1992; Rao i Ballard, 1999).



Rysunek 8. Schemat przetwarzania złożonej sceny akustycznej [opracowanie własne na podstawie: Elhilali (2017)]

Zarówno koncepcja koherencji czasowej, jak i modele oparte na przewidywaniu dostarczają informacji, że czynnik przewidywalności czasowej jest nieodłącznie wpisany w analizę sceny akustycznej (Chi i Shamma, 2005). W literaturze zaobserwować można dowody behawioralne na możliwość wykorzystania przewidywalności jako wskazówki, by przyspieszyć czas wykonania zadania (Emberson i in., 2011; Lewald i Getzmann, 2015). Lu i in. (2017) sugerują, że zdolność wykrywania relacji temporalnych jest kluczowa dla percepcji sceny akustycznej – pozwala bowiem integrować informacje w czasie rzeczywistym i antycypować przyszły rozwój wydarzeń. Jest to zgodne z obserwacją Bendixen (2014), która sugeruje, że informacja związana z przewidywalnością czasową może być wykorzystana zarówno do pionowej, jak i poziomej dekompozycji sygnału.

Mechanizmy lokalizacji dźwięku odgrywają dużą rolę dla wzajemnego oddziaływania segregacji słuchowej oraz grupowania i tworzenia obiektów podczas analizy sceny akustycznej (Arbogast i in., 2002; Brungart i Simpson, 2002; Freyman i in., 2001; Marrone i in., 2008a, 2008b). Co więcej, percepcja mowy w sytuacji słuchania wielu rozmówców jest znacznie lepsza, gdy a priori dostarczana jest informacja przestrzenna o lokalizacji celu (Getzmann i in., 2014; Kidd i in., 2005). Analiza przestrzenna może być

zatem istotnym elementem procesów związanych z analizą złożonej sceny akustycznej. W sytuacji złożonej sceny akustycznej lokalizacja celu wymaga zwiększonego wysiłku uwagi, a zatem jest znacznie bardziej wymagająca dla systemu słuchowego niż lokalizacja źródła prezentowanego w izolacji (Lewald i Getzmann, 2015). W związku z tym istnieje coraz więcej dowodów na to, że sieć neuronalna zaangażowana w lokalizację dźwięku w złożonej scenie akustycznej może być częściowo różna od sieci aktywnej podczas lokalizacji celu w ciszy.

Jedną z prób weryfikacji wpływu przewidywalności przestrzennej na wykonanie zadania w warunkach złożonej sceny akustycznej dostarczył zespół Kidd i in. (2005). Zadanie eksperymentalne dotyczyło zaangażowania uwagi w wymiarze przestrzennym w wysoce niepewnej sytuacji słuchania wielu mówców. Osoba badana miała w nim zidentyfikować kluczowe słowa wypowiedziane przez docelowego rozmówcę, ignorując przy tym szum generowany przez pozostałych mówców. Gdy słuchacz nie miał wiedzy a priori o miejscu docelowym ani o tym, które z trzech zdań jest zdaniem docelowym, jego wyniki były stosunkowo niskie. Kiedy informacja o lokalizacji przestrzennej była podawana przed próbą, wyniki poprawiały się istotnie. Podobny efekt zaobserwowano także w innym badaniu, w którym osoby miały za zadanie określić, czy wymawiane słowa są parzyste czy nieparzyste (Addleman i Jiang, 2019b). Cel występował jednak częściej w jednej z lokalizacji w porównaniu do pozostałych trzech. Uczestnicy byli szybsi w identyfikowaniu celów pojawiających się w lokalizacji o wysokim prawdopodobieństwie w porównaniu do lokalizacji o niskim prawdopodobieństwie wystąpienia celu.

Obserwowane efekty dla wymiaru przestrzennego miały miejsce najczęściej wtedy, gdy wzrastała trudność – związana z zadaniem lub organizacją percepcyjną. Efekt był również wyraźny w sytuacji przekazywania jawnej informacji na temat organizacji statystycznej lokalizacji dźwięków. W sytuacji organizacji niejawnej często obserwowane były niewielkie efekty, co przyczyniło się do prób wyłonienia prawdopodobnych przyczyn tego zjawiska. Jedną z potencjalnych przyczyn mogła być mała wielkość obserwowanych efektów (Mondor i Zattore, 1995; Mondor i in., 1998; Spence i Driver, 1994). Arbogast i Kidd (2000) zaobserwowali efekt informacji przestrzennej dla szybkości wykonania zadania, ale był on stosunkowo mały i występował, gdy środowisko akustyczne było bardzo złożone i niepewne. W rzeczywistości większość ostatnich prac nad uwagą przestrzenną wykorzystywała proste bodźce i zadania, takie jak wykrywanie obecności

dźwięku prostego w ciszy lub w hałasie. Nie wykazywały one zatem bliskiej korespondencji z problemem złożonej sceny akustycznej. Ericson i in. (2004) zaobserwowali, że wydajność identyfikacji celu jest wyższa, gdy jego lokalizacja jest stała niż wtedy, gdy się zmienia. Brungart i Simpson (2007) rozszerzyli te wyniki na warunki, w których lokalizacja celu zmieniała się probabilistycznie w różnych próbach w ramach jednego przebiegu. Wraz ze wzrostem prawdopodobieństwa zmiany lokalizacji, spadała wydajność identyfikacji celu. Wyniki badań Ericsona i in. (2004) oraz Brungarta i Simpsona (2007) sugerują, że zaobserwowany efekt wydaje się być spowodowany głównie ukierunkowaną uwagą. Ważnym czynnikiem była także obecność wysokiego stopnia niepewności. Być może rola przestrzennej koncentracji uwagi ujawnia się łatwiej, gdy zadanie słuchowe jest bardzo wymagające i powoduje duże obciążenie osoby badanej. Brungart i Simpson (2002) efekt korzystania z informacji przestrzennej przypisują większej trudności w ignorowaniu dwóch źródeł, a nie jednego, podczas wykonywania trudnego zadania. Kidd i in. (2003) uzyskali podobny efekt, a jeszcze większą trudność uzyskano w warunku trzech rozmówców (Hawley i in., 2004; Yost i in., 1996).

Powyższe badania sugerują, że wysokie obciążenie przetwarzania spowodowane zwiększoną liczbą dystraktorów przyczynia się do wzrostu korzystnego efektu informacji a priori, zwłaszcza informacji o najbardziej prawdopodobnej lokalizacji celu. Informacja temporalna z kolei uważana jest za immanentnie wpisaną w naturę przetwarzania informacji akustycznej. Badania nad wpływem przewidywalności na orientację uwagi i przetwarzanie sceny akustycznej cechują się w dużej mierze weryfikacją hipotez i pytań badawczych na poziomie danych behawioralnych. Kwestia weryfikacji powyższych efektów na poziomie aktywności elektrofizjologicznej mózgu dostarczyć może informacji na temat czasowego aspektu tego procesu. Wciąż nie jest bowiem wiadome, czy przewidywalność w wymiarze czasowym, przestrzennym oraz czasowo-przestrzennym angażuje procesy związane ze wcześniejszymi (N1) czy późniejszymi etapami (P3) przetwarzania.

#### **3.2.4. Złożona scena akustyczna: zasada kolejności**

Mechanizmy mózgowie zaangażowane w przetwarzanie złożonych scen mogą być interpretowane na wielu poziomach. Oprócz fizycznych właściwości dźwięków w środowisku, człowiek wykorzystuje wiedzę wyuczoną z doświadczenia – zdobytego ostatnio, jak i w ciągu całego życia, aby przetwarzać złożone sceny akustyczne (Bregman

1990/4; Ciocca 2008). Te wyuczone schematy obejmują znajomość statystycznej struktury źródeł dźwięku, niedawne i długotrwałe wspomnienia dotyczące konkretnych źródeł, oczekiwania dotyczące stanu świata, jak również stan uwagi, który pomaga skierować procesy mózgowie na interesujące podmiot cele, ignorując zakłócenia tła. Uważa się, że procesy te odgrywają kluczową rolę podczas analizy sceny akustycznej, ponieważ nakładają ograniczenia na przestrzeń możliwych rozwiązań. Spośród wszystkich procesów opartych na schematach uwaga jest jednym z najszerzej badanych mechanizmów odgórnych (Shinn-Cunningham, 2008). Jest ona kluczowym elementem w procesie analizy sceny, ponieważ dyktuje, jakie cele są przedmiotem zainteresowania i kieruje słuchacza do pożądanego źródła lub źródeł dźwięku. Działa jak wąskie gardło przetwarzania, które odpowiednio alokuje zasoby neuronowe do informatywnych zdarzeń w scenie akustycznej i selektywnie filtruje najbardziej istotne wejścia sensoryczne (Whiteley i Sahani 2012).

Naturalne sceny są wysoce ustrukturyzowane, zawierają statystyczne prawidłowości zarówno natury przestrzennej, jak i temporalnej (McDermott i in., 2013; Theunissen i Elie, 2014). Coraz więcej prac sugeruje, że ludzki mózg jest wrażliwy na strukturę statystyczną (Barascud i in., 2016; Costa-Faidella i in., 2011; Garrido i in., 2013; Rao i Ballard, 1999) i wykorzystuje ją do efektywnej analizy sceny akustycznej (Andreou i in., 2011; Bendixen, 2014). Odkrycie procesu, dzięki któremu przewidywalność współgra z uwagą w celu przetworzenia informacji akustycznej, jest kluczowym wyzwaniem dla neuronauki w ramach wszystkich modalności i wymiarów (Summerfield i de Lange, 2014; Summerfield i Egner, 2016). W większości przypadków przewidywalność w relacji z uwagą była jednak badana dla prostej sceny akustycznej (Bendixen, 2014; Chennu i in., 2013; Kok i in., 2012; Murray i in., 2002).

Najnowsze modele opisujące proces analizy złożonej sceny akustycznej i jego biologiczne podstawy zaczęły koncentrować się na roli procesów opartych na schematach, w szczególności na uwadze w każdej z jej form ukierunkowania: oddolnej i odgórnej, a także doświadczenia (Kaya i Elhilali 2014; Shamma i in., 2011). Mechanizmy ukierunkowania można wiązać ze śledzeniem regularności – procesem leżącym u podstaw percepcji scen słuchowych (Winkler i in. 2009). W tym schemacie strategia mózgu polega na rejestracji zmienności źródeł dźwięku, a także ich czasowo zależnych statystyk. Jest to zatem ciągłe generowanie nowych oczekiwań, które odzwierciedlają wierność dowodów sensorycznych, i dopasowywanie tych przewidywań do bieżącej dynamiki



sceny. Strategia ta doprowadziła do opracowania udanych obliczeniowych modeli analizy sceny słuchowej, ujętych jako odkrywanie przewidywalnych wzorców w scenie (Mill i in., 2013; Schröger i in., 2014) lub rejestrowanie zmian zachodzących w scenie słuchowej i integrowanie przeszłych zdarzeń dla wszystkich źródeł dźwięku z ich oczekiwanymi trajektoriami (Elhilali i Shamma 2008).

Lokalizacja przestrzenna oraz czas pojawienia się dźwięku są silnymi wskazówkami, które ułatwiają proces analizy sceny akustycznej. Kitterick i in. (2010) wykazali korzystne efekty przewidywalności dla cechy bodźca, jego lokalizacji i czasu pojawienia się. Efekt występował jednak tylko wtedy, gdy wskazówka dotyczyła złożonej sceny akustycznej. Pojedyncze źródło dźwięku zniosło efekt przewidywalności przestrzennej, prawdopodobnie ze względu na automatyczną orientację. Oznacza to, że informacja statystyczna dotycząca przestrzennej lokalizacji celu może wspomóc proces wyodrębniania pojedynczego strumienia mowy z mieszaniny strumieni (Best i in., 2007, 2009; Kidd i in., 2005). Sohoglu i Chait (2016) sprawdzali, jak wrażliwość na statystykę wejściową ułatwia analizę sceny akustycznej. Osoby badane słuchały „scen” składających się z kilku równoległych źródeł dźwięku. W sporadycznych próbach pojawiało się dodatkowe źródło dźwięku. Słuchacze byli bardziej dokładni i szybciej wykrywali pojawienie się nowego źródła w scenach składających się z czasowo regularnych niż losowych źródeł. Aby zrozumieć neurobiologiczne podstawy tego efektu, Sohoglu i Chait (2016) zarejestrowali również aktywność mózgu słuchaczy za pomocą magnetoencefalografu (MEG). Aktywność ta wzrastała, gdy sceny dźwiękowe zawierały regularnie powtarzające się dźwięki. Wydaje się więc, że mózg nadawał priorytet powtarzającym się dźwiękom, co poprawiało zdolność słuchaczy do wykrywania nowych źródeł dźwięku. Początkowo powyższy efekt budził kontrowersje, ponieważ względna zmiana odpowiedzi neuronów na nowy składnik spektralny (czyli pojawiające się źródło) powinna zazwyczaj być większa i tym samym bardziej wykrywalna w scenach regularnych w porównaniu z losowymi (Erviti i in., 2011; Hartmann i Goupell, 2006; Summerfield i in., 1987). Odkrycie to jest przeciwne do tego, czego można by się spodziewać na podstawie działania mechanizmu adaptacji, tj. zmniejszonych odpowiedzi neuronalnych dla zdarzeń czasowo regularnych, co zostało wcześniej zaobserwowane dla izolowanych sekwencji prostych dźwięków (Costa-Faidella i in., 2011; Schwartze i in., 2013; Tavano i in., 2014).

Jednakże inne prace wykazały, że statystycznie regularne wzorce mogą być związane ze zwiększonymi odpowiedziami neuronalnymi (Barascud i in., 2016; Chennu i in., 2013; Hsu i in., 2014; Kok i in., 2012). Efekty te interpretowane są jako odzwierciedlające mechanizm śledzący poziom przewidywalności lub precyzji wejścia sensorycznego, miary odwrotnie związanej z niepewnością lub entropią zmiennej. Ten hipotetyczny mechanizm umożliwia wzrost jakości przetwarzania (ang. *up-regulation*) dla informacji, które są niezawodne i prawdopodobnie wskazują na autentyczne zdarzenia w środowisku (Auksztulewicz i Friston, 2015; Feldman i Friston, 2010; Zhao i in., 2013). Ostatnie odkrycia sugerują (nieco sprzecznie z intuicją), że aktywne słuchanie może przeciwdziałać wpływowi regularności, ale jest zgodne z uwagą działającą w celu zmniejszenia „zaskoczenia” (Chennu i in., 2013; Spratling, 2008b). Uwaga (podobnie jak regularność) działa w celu określenia wnioskowanej precyzji wejścia sensorycznego (Barascud i in., 2016; Friston, 2009) – zwiększa więc precyzję (i odpowiedzi neuronalne), gdy sygnały sensoryczne są istotne dla zadania. W tym przypadku wnioskowanie o precyzji jest zmieniane nie przez wewnętrzną strukturę bodźca (np. czy jest czasowo regularny czy losowy), ale przez cele behawioralne słuchacza. Ponieważ zakłada się, że precyzja ma wzmacniający wpływ na aktywność neuronalną, ten sposób rozumowania przewiduje wzmocnienie efektu regularności przez uwagę. Efekt ten potwierdzony został przez zespół Hsu i in. (2014), którzy wykazali, że efekt przewidywalności wzorców wysokości dźwięku jest silny szczególnie wtedy, gdy znajdują się one w strumieniu uwagi.

### **3.3. Podsumowanie**

Standardowym behawioralnym wskaźnikiem facylitacji w badaniach nad uwagą (w tym uwagą słuchową) jest czas reakcji (niekiedy także poprawność odpowiedzi). Zgodnie z mechanizmem neuronalnego przygotowania, orientacja uwagi pozwala człowiekowi na przyspieszoną percepcję. Miarami pozwalającymi precyzyjniej weryfikować przebieg czasowy procesu uwagowego są wskaźniki elektrofizjologiczne. Jedną z miar pozwalających śledzić przebieg procesu orientacji jest pomiar mózgowych potencjałów skorelowanych ze zdarzeniem (ang. *event related potentials*; ang. *ERPs*). Pozwalają one uwzględnić procesy orientacji, w tym szczególnie istotne procesy towarzyszące percepcji celu. Klasycznie wyróżnia się dwie grupy procesów: przeduwagowe (ang. *preattentive*) oraz uwagowe (ang. *attentive*; Treisman i Gelade, 1980). Za główny marker wczesnych procesów w przypadku bodźców słuchowych,

przewidywalności i uwagi uznawany jest komponent N1 (Lange, 2013; Lange i Schnuerch, 2014). Za komponent związany z późniejszym przetwarzaniem uznawany jest P3, który kojarzony jest najczęściej z integracją informacji płynących z różnych modalności i wymiarów (Lange, 2012; Rimmele i in., 2011). Miarą uwzględnianą w badaniach jest amplituda wspomnianych komponentów. Oba powyższe komponenty w literaturze związane są także z zagadnieniem prawdopodobieństwa, Teorią Kodowania Predykcji, a także statystykami bayesowskimi. Te ostatnie występują także w modelach uwagi słuchowej (Kaya i Elhilali, 2014). W niniejszym opracowaniu wzrost amplitudy komponentu N1 utożsamiany jest z procesem uwagi, na który może mieć wpływ historia wyboru – w szczególności rozumiana jako wiedza statystyczna wyuczona w trakcie badania. W przypadku niniejszego opracowania uwaga rozumiana jest jako precyzja predykcji, co przewiduje wzmocnienie komponentu N1 w sytuacji wskazówki nieinformatywnej dla ogólnego wykonania zadania. W takiej sytuacji uwaga wciąż powinna być zaangażowana. Facylitacja rozumiana jest jako możliwość szybszego i bardziej precyzyjnego ukierunkowania ogniska uwagi na moment w czasie i przestrzeni pojawienia się bodźca dzięki zdobytej wcześniej przewidywalności w tych wymiarach. Komponent P3 z kolei rozumiany jest jako stopień integracji informacji pochodzących z różnych obszarów mózgowych (Picton, 1992), jak i korelat stopnia pewności zadanego na starcie prawdopodobieństwa a priori – tak że im bardziej pewne wystąpienie określonego bodźca, tym wyższa amplituda komponentu P3 (Kopp i in., 2016).

Podsumowując, zauważyć można, że pomimo konieczności rozłącznej analizy każdego z układów możliwych do wyodrębnienia w oparciu o typ sceny akustycznej i rodzaj zasady statystycznej, te same miary pojawiają się w literaturze – szczególnie uwzględniające miary behawioralne (czas reakcji), a także miary elektrofizjologiczne (komponenty N1 oraz P3). Odseparowanie od siebie poszczególnych układów pozwoli zweryfikować, czy potencjalny brak efektów obserwowany w literaturze lub przeciwstawne wyniki wiążą się z różnym definiowaniem przewidywalności oraz uwagi, a także przede wszystkim braku kontroli zmiennych, które mogą ów wpływ moderować. W szczególności dotyczy to własności statystycznych, a także środowiska akustycznego. W niniejszym opracowaniu, niezależnie od rodzaju eksperymentu, zakłada się, że przewidywalność w wymiarach: czasowym, przestrzennym i czasowo-przestrzennym pełni facylitacyjną funkcję w porównaniu do braku przewidywalności. Przejawiać się to będzie skróceniem czasów reakcji, a także zmianą wielkości amplitud

dwóch kluczowych komponentów związanych zarówno z przewidywalnością, jak i uwagą (N1 i P3). Ze względu na układ statystyczny proponujący sytuację niepewności, zgodnie z TKP predykcje powinny wyostrzać działanie uwagi zarówno na poziomie wczesnego przetwarzania (N1), jak i na etapie związanym z przetwarzaniem zadania (P3). Ponadto kontrolą objęto także komponenty P1 i N2 jako sporadycznie pojawiające się w literaturze – jednak ze względu na małą ilość przesłanek pozostawiono wpływ przewidywalności na przetwarzanie tych etapów na poziomie pytania badawczego. Podsumowując, w oparciu o przedstawiony materiał źródłowy sformułowano następujące pytania badawcze i odpowiadające na nie hipotezy, które zostały poddane weryfikacji w czterech eksperymentach zaplanowanych w badaniu (pytania i hipotezy są tożsame dla wszystkich eksperymentów):

P1: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze czasowym w porównaniu do braku przewidywalności pozwoli na szybsze wykonanie zadania?

P2: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze czasowym w porównaniu do braku przewidywalności cechować się będzie większą amplitudą N1?

P3: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze czasowym w porównaniu do braku przewidywalności cechować się będzie większą amplitudą P3?

P4: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym w porównaniu do braku przewidywalności pozwoli na szybsze wykonanie zadania?

P5: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym w porównaniu do braku przewidywalności cechować się będzie większą amplitudą N1?

P6: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym w porównaniu do braku przewidywalności cechować się będzie większą amplitudą P3?

P7: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym i czasowym w porównaniu do braku przewidywalności pozwoli na szybsze wykonanie zadania?

P8: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym i czasowym w porównaniu do braku przewidywalności cechować się będzie większą amplitudą N1?

P9: Czy przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym i czasowym w porównaniu do braku przewidywalności cechować się będzie większą amplitudą P3?

H1: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze czasowym w porównaniu do braku przewidywalności pozwala na szybsze wykonanie zadania (skrócenie czasów reakcji).

H2: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze czasowym w porównaniu do braku przewidywalności cechuje się zwiększeniem zasobów uwagi słuchowej ukierunkowanej na bodziec (wzrost amplitudy komponentu N1).

H3: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze czasowym w porównaniu do braku przewidywalności cechuje się zwiększeniem zasobów uwagi słuchowej ukierunkowanej na zadanie (wzrost amplitudy komponentu P3).

H4: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym w porównaniu do braku przewidywalności pozwala na szybsze wykonanie zadania (skrócenie czasów reakcji).

H5: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym w porównaniu do braku przewidywalności cechuje się zwiększeniem zasobów uwagi słuchowej ukierunkowanej na bodziec (wzrost amplitudy komponentu N1).

H6: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym w porównaniu do braku przewidywalności cechuje się zwiększeniem zasobów uwagi słuchowej ukierunkowanej na zadanie (wzrost amplitudy komponentu P3).

H7: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym i czasowym w porównaniu do braku przewidywalności pozwala na szybsze wykonanie zadania (skrócenie czasów reakcji).

H8: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym i czasowym w porównaniu do braku przewidywalności cechuje się zwiększeniem zasobów uwagi słuchowej ukierunkowanej na bodziec (wzrost amplitudy komponentu N1).

H9: Przewidywalna ekspozycja bodźca w wymiarze przestrzennym i czasowym w porównaniu do braku przewidywalności cechuje się zwiększeniem zasobów uwagi słuchowej ukierunkowanej na zadanie (wzrost amplitudy komponentu P3).

Dodatkowo z powodu niejednoznacznych wyników w literaturze zdecydowano dołączyć także do analizy komponenty P1 i N2, by zweryfikować, czy także są one wrażliwe na zmiany w zakresie przewidywalności:

P10: Czy istnieją różnice między przewidywalną ekspozycją bodźca w wymiarze czasowym, przestrzennym, czasowo-przestrzennym a brakiem przewidywalności w zakresie zaangażowania zasobów uwagi słuchowej ukierunkowanej na bodziec (zmiana amplitudy komponentu P1)?

P11: Czy istnieją różnice między przewidywalną ekspozycją bodźca w wymiarze czasowym, przestrzennym, czasowo-przestrzennym a brakiem przewidywalności w zakresie zaangażowania zasobów uwagi słuchowej ukierunkowanej na zadanie (zmiana amplitudy komponentu N2)?

## 4. Metodologia badań

### 4.1. Wprowadzenie

W celu odpowiedzi na pytania badawcze zaplanowano cztery eksperymenty. Podstawą ich wyodrębnienia był typ sceny akustycznej (prosta lub złożona) oraz zasada organizacji statystycznej bodźców (zasada częstości lub kolejności). Każdy z eksperymentów uwzględniał cztery bloki będące kolejnymi poziomami zmiennej niezależnej (tab. 1). Zmienna niezależna została utworzona w oparciu o wymiar przewidywalności (przestrzenny, czasowy, czasowo-przestrzenny) i warunek kontrolny, gdzie przewidywalność nie mogła zostać wyuczona. Poziomami zmiennej niezależnej były:

- (1) przewidywalna lokalizacja, nieprzewidywalny interwał pojawienia się bodźca ( $S^+ T^-$ , warunek przewidywalności przestrzennej);
- (2) nieprzewidywalna lokalizacja, przewidywalny interwał pojawienia się bodźca ( $S^- T^+$ , warunek przewidywalności czasowej);
- (3) przewidywalna lokalizacja, przewidywalny interwał pojawienia się bodźca ( $S^+ T^+$ , warunek przewidywalności czasowo-przestrzennej);
- (4) nieprzewidywalna lokalizacja, nieprzewidywalny interwał pojawienia się bodźca ( $S^- T^-$ , warunek braku przewidywalności).

Bloki w każdym eksperymencie stanowiły jednocześnie cztery warunki eksperymentalne. Zmiennymi kontrolowanymi były płeć oraz wiek uczestników, natomiast

wśród stałych uwzględniono: horyzontalną płaszczyznę prezentacji dźwięków, głośność i tonalność dźwięków, odległość głośników od uczestników.

Tabela 1

*Układ badawczy i warunki eksperymentalne*

<b>EKSPERYMENT</b>	<b>BLOKI</b>
I: Zasada częstości, prosta scena akustyczna	1. Przewidywalna lokalizacja, przewidywalny interwał
II: Zasada kolejności, prosta scena akustyczna	2. Przewidywalna lokalizacja, nieprzewidywalny interwał
III: Zasada częstości, złożona scena akustyczna	3. Nieprzewidywalna lokalizacja, przewidywalny interwał
IV: Zasada kolejności, złożona scena akustyczna	4. Nieprzewidywalna lokalizacja, nieprzewidywalny interwał

Kolejne podrozdziały związane są z charakterystyką próby, materiałami i bodźcami prezentowanymi i wykorzystywanymi w eksperymentach, a także opisem procedury eksperymentalnej.

#### **4.2. Osoby badane**

Przed rozpoczęciem badań w pierwszej kolejności podjęto próbę ustalenia minimalnej liczebności próby na eksperyment ( $N = 16$ ). Została ona wyliczona w oparciu o program G\*Power (v. 3.1.9.7) dla analizy ANOVA z powtarzanym pomiarem,  $f = 0,35$ ;  $\alpha = 0,05$ ;  $1 - \beta = 0,9$  (aneks, tab. 1). Podczas rekrutacji kontrolowano za pomocą ankiety, czy uczestnicy cechowali się słuchem w normie, normalnym lub skorygowanym do normalnego wzrokiem, a także brakiem interwencji neurochirurgicznych i zaburzeń neurologicznych lub psychiatrycznych. Warunkiem uczestnictwa był także brak wykształcenia formalnego w dziedzinie muzyki. Od wszystkich uczestników uzyskano

świadomą, pisemną zgodę. Na koniec badania każdy uczestnik otrzymał wynagrodzenie (20 PLN) za udział oraz podstawowe wyjaśnienie dotyczące celu badania.

W całym badaniu, na które składały się cztery eksperymenty, udział wzięło 78 osób ( $M_{\text{wiek}} = 23,56$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 2,93$ ). Grupa osób badanych objęła: 42 kobiety ( $M_{\text{wiek}} = 23,45$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 2,72$ ) i 36 mężczyzn ( $M_{\text{wiek}} = 23,69$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 3,19$ ). W pierwszej kolejności zgromadzono bazę osób chętnych do udziału w badaniu i spełniającą określone parametry zmiennych kontrolowanych. Następnie losowano i przyporządkowywano osoby do eksperymentów (randomizacja II stopnia).

W badaniu pierwszym wzięło udział 19 osób ( $M_{\text{wiek}} = 23,26$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 3,14$ ). Grupa osób badanych objęła 12 kobiet ( $M_{\text{wiek}} = 23,17$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 3,76$ ) i 7 mężczyzn ( $M_{\text{wiek}} = 23,43$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 1,90$ ).

W badaniu drugim wzięło udział 20 osób ( $M_{\text{wiek}} = 23,55$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 3,19$ ). Grupa osób badanych objęła 11 kobiet ( $M_{\text{wiek}} = 23,64$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 2,73$ ) i 9 mężczyzn ( $M_{\text{wiek}} = 23,44$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 3,84$ ).

W badaniu trzecim wzięło udział 19 osób ( $M_{\text{wiek}} = 23,42$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 2,06$ ). Grupa osób badanych objęła 8 kobiet ( $M_{\text{wiek}} = 23,75$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 2,19$ ) i 11 mężczyzn ( $M_{\text{wiek}} = 23,18$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 2,04$ ).

W badaniu czwartym wzięło udział 20 osób ( $M_{\text{wiek}} = 24,00$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 3,29$ ). Grupa osób badanych objęła 11 kobiet ( $M_{\text{wiek}} = 23,36$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 1,91$ ) i 9 mężczyzn ( $M_{\text{wiek}} = 24,78$ ;  $SD_{\text{wiek}} = 4,47$ ).

### **4.3. Materiały i aparatura badawcza**

#### **4.3.1. Bodźce**

Badanie dotyczyło wykonania zadania dyskryminacyjnego. Polegało ono na odróżnieniu dźwięku prostego ( $f_0=880$  Hz) od dźwięku złożonego z czterech harmonicznymi ( $f_0=880$  Hz;  $f_1=1760$  Hz,  $f_2=2640$  Hz,  $f_3=3520$  Hz). Dźwięki zostały stworzone w programie Audacity (częstotliwość próbkowania = 44100 Hz, rozdzielczość = 32 bity). Dźwięki miały stałe następujące parametry: głośność (80 dB SPL), czas trwania (100 ms) oraz obwiednię czasową składającą się z liniowego transjentu początkowego (10 ms), po którym następowała część o stałym przebiegu (80ms) i wykładniczy transjent końcowy (10 ms). Każdą próbę rozpoczynał dźwięk „klik”, który cechował się głośnością



80 dB SPL i czasem trwania 100 ms. W przypadku złożonej sceny akustycznej obok dźwięku prostego lub złożonego prezentowany był równolegle biały szum dobiegający z pozostałych głośników o zrównoważonej głośności i czasie trwania 100 ms.

#### **4.3.2. Aparatura**

##### **4.3.2.1. Aparatura do prezentacji procedury eksperymentalnej i treningowej oraz ekspozycji bodźców.**

Dźwięki były prezentowane uczestnikom przez głośniki YAMAHA model HS 50M (230V, 45W, 50Hz), a ich głośność była kontrolowana i skalibrowana za pomocą sonometru AZ8922 (Background Noise Absorber RS232, 30-130 dB), z dokładnością pomiaru  $\pm 1,5$  dB i zakresem częstotliwości 31,5 Hz - 8 kHz.

Punkt fiksacji, na którym uwagę skupiać miały osoby badane, wyświetlany był na monitorze NEC MultiSync SpectraView® Reference 242 (27"). Procedura eksperymentalna została przygotowana w programie PsychoPy.

Pad do udzielania odpowiedzi wyposażony był w dwa klawisze położone na jego osi wertykalnej.

##### **4.3.2.2. Aparatura do rejestracji aktywności bioelektrycznej mózgu**

Sygnal EEG rejestrowano z 64 zamontowanych na czepku aktywnych elektrod (Ag/AgCl). Elektrody ułożone były zgodnie z międzynarodowym systemem rozmieszczenia 10-20 (ActiCAP, Brain Products, GmbH, Niemcy). Elektrody podłączone były do wzmacniacza Net Amps 300 (Electrical Geodesics, Inc., Eugene, Oregon, USA). Rejestracja danych elektrofizjologicznych była prowadzona w programie NetStation 2.0.

#### **4.4. Procedura**

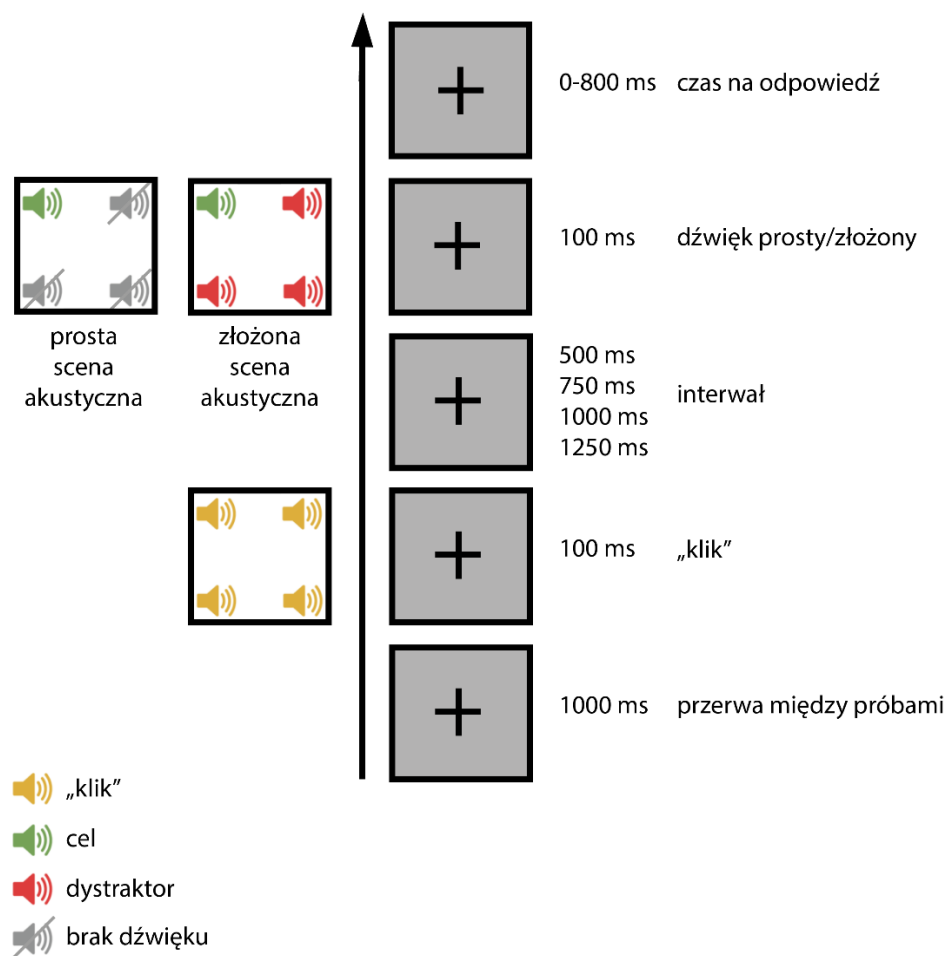
W ramach każdego eksperymentu przeprowadzono rejestrację aktywności bioelektrycznej mózgu. Przed rozpoczęciem badania uczestnicy zapoznawani byli z instrukcją i zasadami uczestnictwa. Warunkiem przystąpienia do badania było wyrażenie pisemnej zgody. W kolejnym kroku dokonywano pomiarów wielkości obwodu głowy osoby badanej, by dobrać odpowiedni czepki z elektrodami. Następnie dokonywano kalibracji aparatury i weryfikacji poziomu uzyskanej impedancji (oporności elektrycznej na elektrodach), po czym rozpoczynało się badanie. W trakcie przerw między blokami

eksperymentalnymi sprawdzano, czy poziom impedancji elektrod utrzymuje się na odpowiednim poziomie.

Faza testowa w ramach każdego z eksperymentów składała się z czterech bloków, z których każdy zawierał 200 prób, o średnim czasie trwania 3,25 s. Czas trwania eksperymentu obejmował kalibrację czepka EEG (15 min), fazę treningową (15 min) oraz fazę testową (ok. 43 min), co daje łącznie 73 minuty. W przypadku kolejnych bloków w ramach każdego eksperymentu uczestnik miał możliwość odbycia treningu w celu zrozumienia zadania, które będzie musiał wykonać w trakcie głównej części eksperymentu. Różnica między treningiem a częścią właściwą polegała na otrzymywaniu przez osobę badaną informacji zwrotnej o poprawności wykonania zadania. Trening poprzedzający każdy z bloków eksperymentalnych cechował się zróżnicowaną długością, która uzależniona była od decyzji osoby badanej. Gdy uznała, że zadanie jest już w pełni zrozumiałe, mogła przejść do części właściwej eksperymentu. W przypadku wątpliwości uczestnik mógł poprosić o dodatkowe instrukcje i wyjaśnienia eksperymentatora, wzywając go za pomocą sygnalizacji dźwiękowej z użyciem przycisku dzwonka. W takich sytuacjach eksperymentator wchodził do pomieszczenia z zapytaniem o właściwe rozumienie zadania. Po objaśnieniu następował trening i – w sytuacji właściwego zrozumienia zadania – przejście do części głównej badania.

W ramach każdego z bloków eksperymentalnych próby poprzedzane były przerwą, która trwała 1000 ms (ITI). Punkt fiksacji był wyświetlany na ekranie przez cały czas trwania próby. Dźwięk „kliknięcia” emitowany był przez 100 ms i pełnił funkcję odpowiednika wskazówki o rozpoczęciu kolejnej próby. Dźwięk ten różnił się zasadniczo od dźwięków używanych w zadaniu dyskryminacyjnym – był eksponowany ze wszystkich czterech głośników. Po „kliknięciu” następowała przerwa ciszy o długości 500, 750, 1000 lub 1250 ms. Prosty lub złożony dźwięk docelowy pojawiał się następnie w jednej z czterech lokalizacji na 100 ms. W zależności od złożoności sceny akustycznej, pozostałe głośniki emitowały biały szum jako dźwięk rozpraszający (scena złożona) lub nie (scena prosta). Uczestnik miał 800 ms na wykonanie zadania dyskryminacyjnego. Osoba była proszona o jak najszybsze naciśnięcie klawisza „1”, gdy usłyszy dźwięk prosty i naciśnięcie klawisza „5”, gdy usłyszy dźwięk złożony. Jeśli uczestnik nie odpowiedział w wyznaczonym czasie, otrzymywał komunikat: „Proszę o szybszą odpowiedź” i rozpoczynała się kolejna próba. Jeśli uczestnik odpowiedział w limicie czasu, następna próba rozpoczynała się natychmiast po udzieleniu odpowiedzi. Podczas badania osoba

proszona była o skupienie uwagi na punkcie fiksacyjnym, którym był krzyż wyświetlany na monitorze. Schematyczny przebieg pojedynczej próby dla każdego eksperymentu przedstawiono na rys. 9.

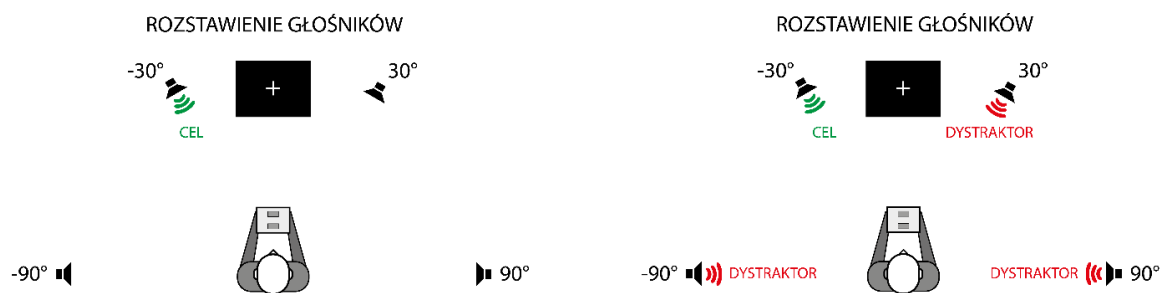


Rysunek 9. Graficzny schemat przebiegu próby dla eksperymentów: I, II, III i IV

W dalszej części przedstawiono sposób aranżacji bodźców i prób w ramach poszczególnych eksperymentów, aby utworzyć kolejno określony typ sceny akustycznej bądź organizacji statystycznej.

#### 4.4.1. Typ sceny akustycznej

Sceny akustyczne różniły się wyłącznie ilością dźwięków emitowanych jednocześnie w jednostce czasu (rys. 10). W przypadku prostej sceny akustycznej był to jeden dźwięk będący przedmiotem zadania dyskryminacji, natomiast dla złożonej sceny akustycznej każdy z czterech głośników emitował dźwięki, przy czym jeden dźwięk będący celem, a pozostałe – biały szum.



Rysunek 10. Schemat prostej (na lewo) i złożonej sceny akustycznej (na prawo) [opracowanie własne na podstawie: Lewald i Getzmann (2015)]

Dla obu scen akustycznych pozycja uczestnika dostosowywana była do wysokości głośników (1,2 m) ustawionych na półokręgu o promieniu 2 m. Wysokość fotela, na którym siedziała osoba badana była tak dobrana, aby uszy znajdowały się na wysokości emitera dźwięku. Przed uczestnikami (0°) znajdował się monitor (umieszczony na półokręgu utworzonym przez głośniki), który wyświetlał punkt fiksacji, na którym badani mieli skupiać swój wzrok. Zabieg ten służył redukcji artefaktów pochodzących od ruchów oczu lub głowy.

#### 4.4.2. Organizacja statystyczna prób w ramach poszczególnych eksperymentów

Organizacja statystyczna w projektowanych eksperymentach została oparta o klasyczny podział obecny w literaturze na dwa podstawowe sposoby uczenia się przewidywalności: zasadę częstości i kolejności. Zasada częstości dotyczy probabilistycznej dystrybucji lokalizacji oraz czasu pojawiania się bodźców w ramach kolejnych bloków. Zasada kolejności odnosi się do powtarzalnej w czasie sekwencji lokalizacji i czasów pojawiania się bodźców i także przypisana jest do zmian zachodzących w obrębie bloku eksperymentalnego.

Zasada przewidywalnej częstości:

1. Blok [S<sup>-</sup> T<sup>+</sup>]: określony interwał (500, 750, 1000 lub 1250 ms) pojawia się częściej (70%) niż inne – trzy pozostałe interwały mają po 10% szans na wystąpienie; dźwięk pojawia się we wszystkich lokalizacjach z równym prawdopodobieństwem;
2. Blok [S<sup>+</sup> T<sup>-</sup>]: określona lokalizacja przestrzenna pojawia się częściej (70%) niż inne – trzy inne lokalizacje mają po 10% szans na wystąpienie; dźwięk pojawia się z równym prawdopodobieństwem dla każdego z interwałów;

3. Blok  $[S^+ T^+]$ : określony interwał i lokalizacja przestrzenna występuje częściej niż inne (niezależnie);

4. W odniesieniu do bloku  $[S^- T^-]$  zarówno interwały, jak i lokalizacje przestrzenne występują z równym prawdopodobieństwem.

Rodzaj częstego interwału w ramach bloków  $S^+ T^+$  i  $S^- T^-$  (500, 750, 1000 lub 1250 ms) lub częstej lokalizacji przestrzennej w ramach bloków  $S^+ T^+$ ,  $S^+ T^-$  (Lokalizacja 1, Lokalizacja 2, Lokalizacja 3 lub Lokalizacja 4) został zrównoważony pomiędzy uczestnikami, tak że w ramach każdego eksperymentu występowała podobna ilość określonych częstych interwałów i lokalizacji (tab. 2).

Zasada przewidywalnej kolejności:

1. Blok  $[S^- T^+]$ : interwały czasowe w kolejnych próbach tworzą stały, powtarzający się ciąg:

Interwał 1  $\rightarrow$  Interwał 2  $\rightarrow$  Interwał 3  $\rightarrow$  Interwał 4; lokalizacje rozkładają się z równym prawdopodobieństwem;

2. Blok  $[S^+ T^-]$ : lokalizacje tworzą stałą, powtarzalną sekwencję:

Lokalizacja 1  $\rightarrow$  Lokalizacja 2  $\rightarrow$  Lokalizacja 3  $\rightarrow$  Lokalizacja 4; interwały są prezentowane z równym prawdopodobieństwem;

3. Blok  $[S^+ T^+]$ : określony interwał i lokalizacja przestrzenna tworzą stały, powtarzalny ciąg (niezależnie);

4. W odniesieniu do bloku  $[S^- T^-]$  zarówno interwały, jak i lokalizacje przestrzenne będą rozmieszczone z równym prawdopodobieństwem.

W przypadku uczenia sekwencyjnego w pierwszej kolejności zweryfikowano unikatowe sekwencje i usunięto sekwencje tożsame. Dla przykładu – sekwencjami tożsamymi względem sekwencji lokalizacji 1-2-3-4 były: 2-3-4-1, 3-4-1-2, 4-1-2-3. Podobnie, sekwencjami dublującymi układ interwałów 500-750-1000-1250 były: 750-1000-1250-500, 1000-1250-500-750 i 1250-500-750-1000. W konsekwencji zabieg ten pozwolił na wyodrębnienie sześciu unikatowych sekwencji: 1234, 1243, 1324, 1342, 1423, 1432 dla lokalizacji oraz 500-750-1000-1250, 500-750-1250-1000, 500-1000-750-1250, 500-1000-1250-750, 500-1250-750-1000, 500-1250-1000-750 dla interwałów. W drugim kroku wyodrębniono sekwencje dla bloku przestrzennego,

czasowego w możliwych kombinacjach, a także dołączono w sposób losowy kombinacje dla warunku czasowo-przestrzennego tak, by nie dublowała się wzorcem dla warunku czasowo-przestrzennego. W konsekwencji pozwoliło to utworzyć 36 możliwych kombinacji. Na początku badania losowano jedną z nich i przyporządkowywano do poszczególnych osób w badaniu. Szczegółowy sposób wyodrębnienia sekwencji użytych w badaniu zawarto w aneksie (tab. 3).

#### **4.5. Rejestracja sygnału EEG**

Rejestrację sygnału EEG prowadzono przy użyciu oprogramowania NetStation 2.0, z odniesieniem online do elektrody FCz i kanału Fz jako elektrody uziemiającej. Sygnał EEG był digitalizowany z częstotliwością 500 Hz i wzmacniany z filtrem pasmowym 0,05-100 Hz. Wszystkie impedancje elektrod były mniejsze niż 5 k $\Omega$ . Zebrane dane EEG były dalej poddawane obróbce offline w programie EEGLAB Version 2019.0 (Matlab R2019b). Na tym etapie zastosowano re-referencję sygnału dla uśrednionego sygnału z elektrod usznych, a następnie dane przefiltrowano za pomocą filtra dolnoprzepustowego o częstotliwości 30 Hz. Artefakty mięśniowe w sygnale EEG, w tym ruchy gałek ocznych i mrugnięcia oczu, były korygowane, a kanały o wysokim poziomie szumu interpolowane przy użyciu metody rekonstrukcji podprzestrzeni artefaktów (Mullen i in., 2015). W czterech eksperymentach ciągły zapis sygnału EEG epokowano na okresy o długości 800 ms, czasowo powiązane z pojawieniem się dźwięku (dźwięk prosty lub dźwięk złożony). Epoki zawierały 200 ms czasu przed bodźcem jako linię podstawową (ang. *baseline*). Zastosowano dodatkową procedurę odrzucania artefaktów z wykorzystaniem analizy niezależnych składowych (ICA; Delorme i Makeig, 2004) i lokalizacji źródeł. Odrzucano niezależne składowe, które zawierały pozostałe sygnały płynące z mięśni, oczu, serca, a także szumy liniowe, szumy kanałowe i inne artefakty, dla których źródło znajdowało się poza mózgiem lub te, które miały nietypowe właściwości mocy spektralnej.

#### **4.6. Strategia analiz**

##### **4.6.1. Analiza danych behawioralnych**

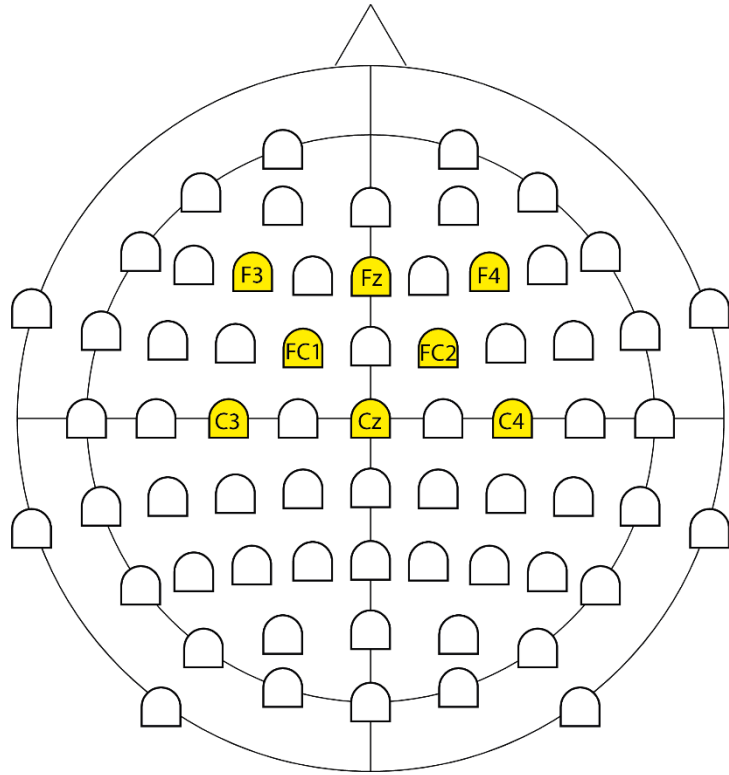
Zadaniem osób badanych podczas eksperymentu było jak najszybsze udzielenie odpowiedzi, dlatego zasadniczym wskaźnikiem behawioralnym uwagi, który uwzględniono w analizie, był czas reakcji. W każdym eksperymencie kontrolowano

jednak poprawność wykonania zadania, celem weryfikacji, czy nie cechował się on poziomem zbliżonym do losowości (50% poprawnych odpowiedzi) lub efektem sufitowym (wyniki bliskie 100% poprawnych odpowiedzi). Opis wyników dla danych behawioralnych rozpoczyna w związku z powyższym analiza częstości dotycząca poprawności odpowiedzi. Dalsza część dotyczy analiz ANOVA z powtarzaniem pomiarem, by zweryfikować wpływ przewidywalności ( $T^+S^+$ ,  $T^+S^-$ ,  $T^-S^+$ ,  $T^-S^-$ ) na średni czas reakcji osób badanych.

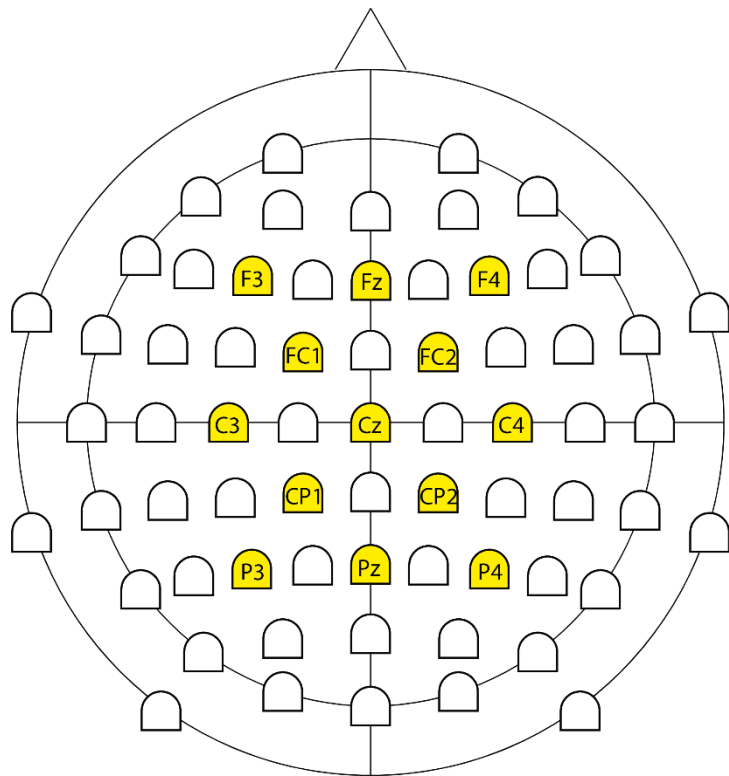
W przypadku testowania hipotez dwukierunkowych posłużono się testem post-hoc z poprawką dla porównań wielokrotnych Bonferroniego, natomiast w przypadku hipotez kierunkowych korzystano z analizy kontrastów prostych (z ostatnią kategorią odniesienia, tj. do warunku  $T^-S^-$ ).

#### **4.6.2. Analiza danych elektrofizjologicznych**

Dla każdego z eksperymentów przeprowadzono analizę ANOVA z powtarzaniem pomiarem, by zweryfikować wpływ przewidywalności ( $T^+S^+$ ,  $T^+S^-$ ,  $T^-S^+$ ,  $T^-S^-$ ), a także dystrybucji elektrod (komponent P1: Fz, Cz, F3, F4, FC1, FC2, C3, C4; komponent N1: Fz, Cz, F3, F4, FC1, FC2, C3, C4 [rys. 11 dla P1 i N1]; komponent N2: Fz, Cz, Pz, F3, F4, FC1, FC2, C3, C4, CP1, CP2, P3, P4 [rys. 12]; komponent P3: Cz, Pz, C3, C4, CP1, CP2, P3, P4 [rys. 13]) na średnią amplitudę każdego z komponentów. Elektrody wyznaczające linię środkową głowy to Fz, Cz, Pz; lateralizację czołową to F3 i F4; lateralizację środkową to C3 i C4; lateralizację ciemieniową to P3 i P4. W sytuacji złamania założenia sferyczności wykonywano test jednowymiarowy Greenhouse-Geisser (G-G) i posługiwano się wartością  $p$  do oznaczania różnic. W przypadku testowania hipotez dwukierunkowych posłużono się testem post-hoc z poprawką dla porównań wielokrotnych Bonferroniego, natomiast w przypadku hipotez kierunkowych korzystano z analizy kontrastów prostych (z ostatnią kategorią odniesienia, tj. do warunku  $T^-S^-$ ).

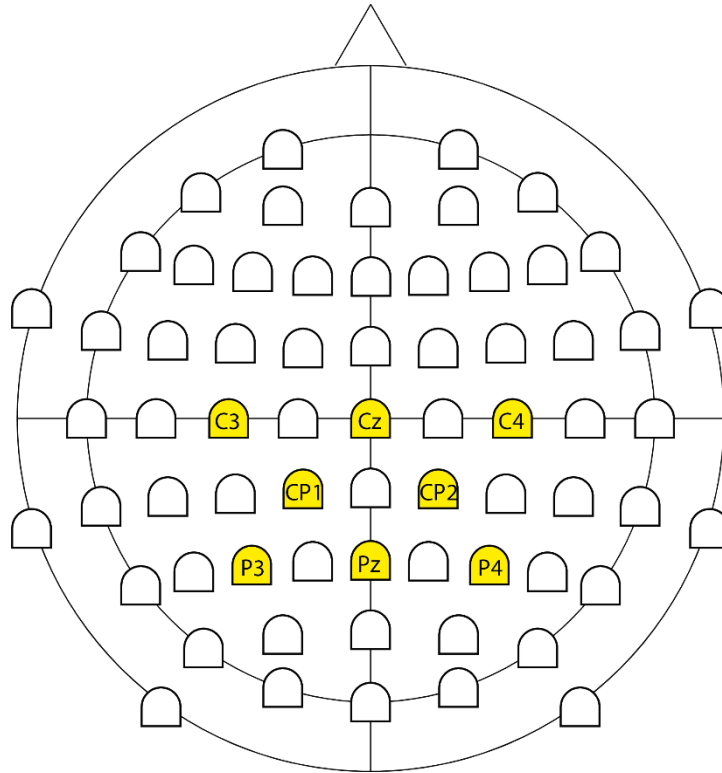


Rysunek 11. Dystrybucja elektrod dla komponentów: P1 i N1



Rysunek 12. Dystrybucja elektrod dla komponentu N2





Rysunek 13. Dystrybucja elektrod dla komponentu P3

Okna czasowe dla poszczególnych komponentów ERP zostały wyliczone w oparciu o szczyt amplitudy dla każdego z nich (tab. 2).

Tabela 2

*Okna czasowe komponentów P1, N1, N2, P3 dla eksperymentów I, II, III, IV*

	P1	N1	N2	P3
Eksperyment 1	20-48	80-108	200-260	308-368
Eksperyment 2	16-44	76-104	196-256	312-372
Eksperyment 3	36-64	88-116	200-260	300-360
Eksperyment 4	40-68	88-116	212-272	326-386

## 5. Wyniki badań własnych

### 5.1. Eksperyment I: prosta scena akustyczna i zasada częstości

#### 5.1.1. Wyniki behawioralne

Analiza przeciętnej poprawności wykonania zadania przez uczestników grupy eksperymentalnej wykazała wyniki wyższe od poziomu losowego (50%) dla każdego z warunków (bloków): przestrzennego ( $M = 92,85\%$ ;  $SD = 4,64\%$ ), czasowego ( $M = 92,85\%$ ;  $SD = 4,63\%$ ), czasowo-przestrzennego ( $M = 91,86\%$ ;  $SD = 6,90\%$ ) i nieprzewidywalnego ( $M = 92,50\%$ ;  $SD = 5,83\%$ ).

Analiza efektów wewnątrzobjektowych (przy spełnionym założeniu sferyczności:  $W$  Mauchly = 0,58;  $\chi^2 = 9,04$ ;  $df = 5$ ;  $p > 0,05$ ) wykazała istotne statystycznie różnice pomiędzy warunkami eksperymentalnymi ze względu na czas wykonania zadania dyskryminacji,  $F(3, 54) = 5,45$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,23$ . Analiza kontrastów wykazała, że czas wykonania był istotnie szybszy,  $F(1, 18) = 13,39$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,43$ , tylko w przypadku warunku czasowo-przestrzennego ( $M = 0,59$  ms;  $SD = 0,06$  ms) w porównaniu do warunku z brakiem przewidywalności ( $M = 0,61$  ms;  $SD = 0,06$  ms).

#### 5.1.2. Wyniki badań ERP

W pierwszej kolejności zweryfikowano istnienie testowanych komponentów (P1, N1, N2 i P3) dla poszczególnych warunków eksperymentalnych w oparciu o test  $t$  dla jednej próby (kryterium jest wartość amplitudy  $\mu V = 0$ ), przy wykorzystaniu reprezentatywnych elektrod (Fz dla komponentów: P1, N1, N2 oraz Pz dla komponentu P3). Jeśli komponent nie występował dla żadnego z warunków, to nie podejmowano dla niego dalszej analizy.

Tabela 3

*Test t dla jednej próby weryfikujący obecność komponentów: P1, N1, N2 i P3 dla eksperymentu I*

Warunek	P1 (Fz)	N1(Fz)	N2(Fz)	P3 (Pz)
S+T-	0,35 (0,74)*	-5,95 (2,34)***	-2,39 (2,59)***	2,94 (2,45)***
S-T+	0,20 (0,86)	-6,87 (3,30)***	-2,32 (2,25)***	2,55 (2,46)***
S+T+	0,76 (1,19)*	-5,50 (2,21)***	-2,11 (2,48)**	2,95 (2,46)***
S-T-	0,46 (0,83)*	-6,05 (2,40)***	-2,07 (2,58)**	2,37 (1,91)***

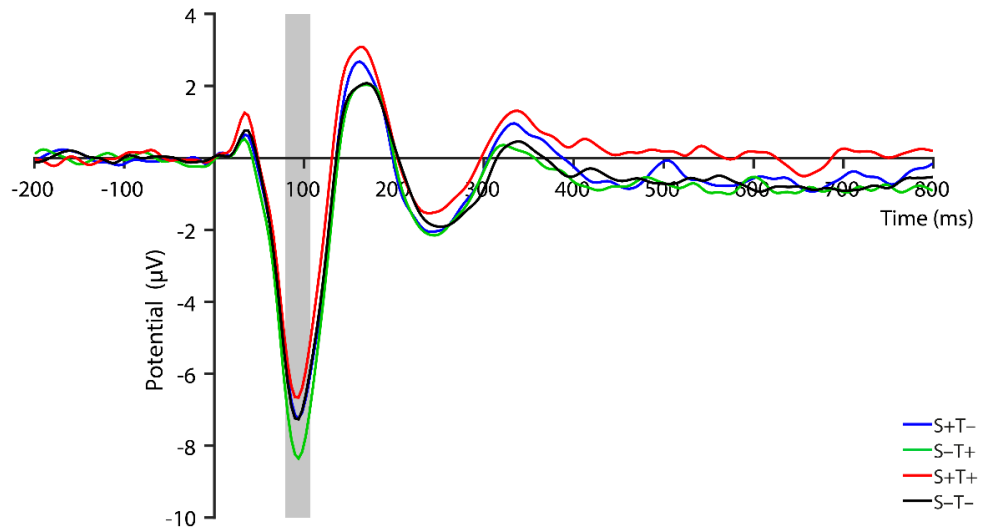
\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$

### **Komponent P1:**

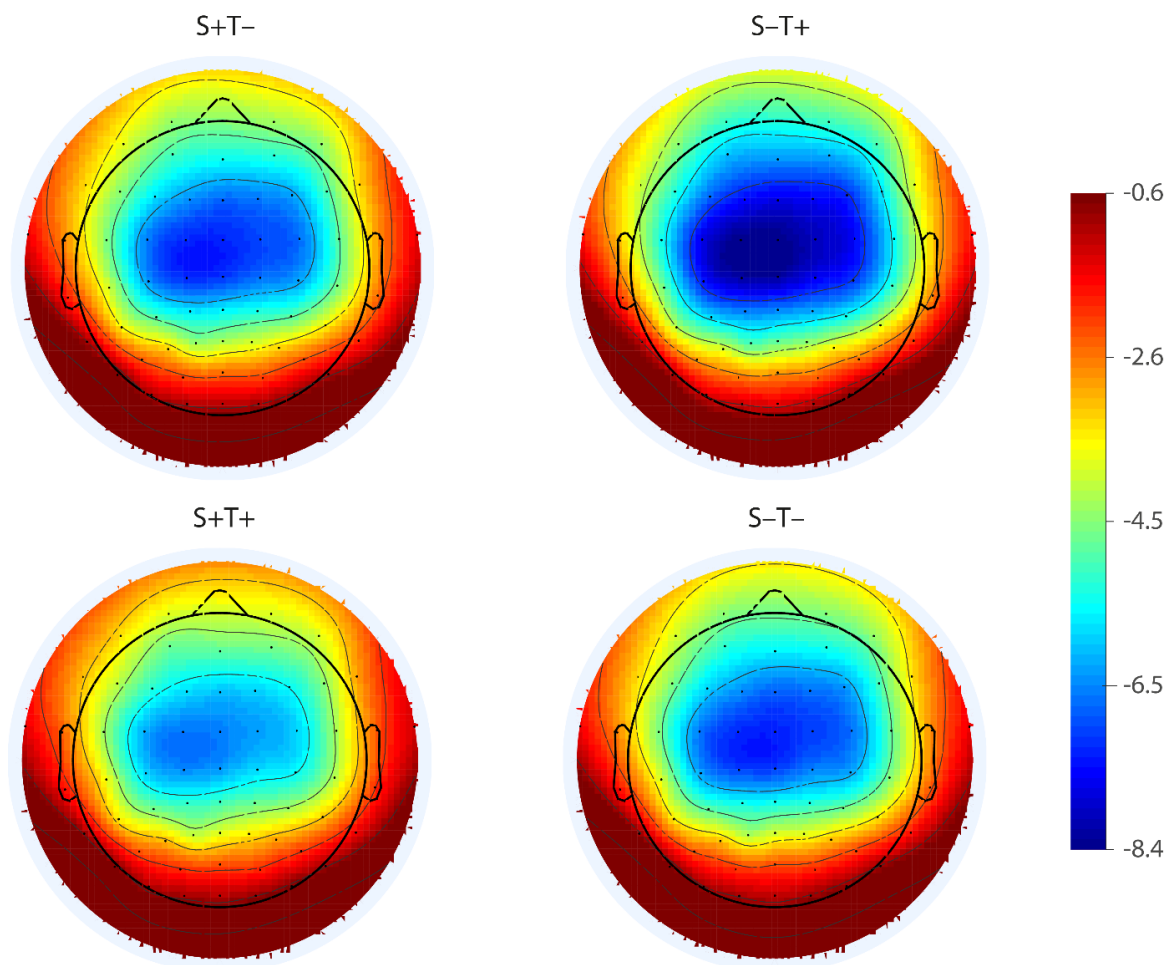
Efekt P1 wystąpił wyłącznie w przypadku przestrzennego, czasowo-przestrzennego, jak i pozbawionego przewidywalności warunku eksperymentalnego. P1 było nieobecne w warunku czasowym. ANOVA wykazała brak istotnych różnic na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3, 54) = 1,99$ ;  $p > 0,05$ , elektrody,  $F(2,44; 43,97) = 2,37$ ;  $p > 0,05$ , oraz interakcji pomiędzy warunkiem eksperymentalnym a elektrodą,  $F(5,77; 103,87) = 0,93$ ;  $p > 0,05$ .

### **Komponent N1:**

ANOVA wykazała istotne różnice zarówno na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(1,86; 33,53) = 6,68$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,27$ , jak i elektrody,  $F(2,24; 40,40) = 6,47$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,26$ . Interakcja między warunkiem eksperymentalnym a elektrodą okazała się natomiast nieistotna,  $F(4,47; 80,51) = 1,16$ ;  $p > 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,06$ . Analiza kontrastów prostych dla warunków eksperymentalnych wykazała, że tylko warunek czasowy różni się od warunku braku przewidywalności w zakresie amplitudy komponentu N1,  $F(1, 18) = 8,68$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,33$ . N1 w przypadku warunku czasowego było istotnie niższe ( $M = -6,77 \mu\text{V}$ ; s.e. =  $0,70 \mu\text{V}$ ) w porównaniu do warunku braku przewidywalności ( $M = -5,87 \mu\text{V}$ ; s.e. =  $0,50 \mu\text{V}$ ).



Rysunek 14. Amplituda komponentu N1 (80-108 ms) mierzonego w eksperymencie I (prosta scena akustyczna, zasada częstotliwości).



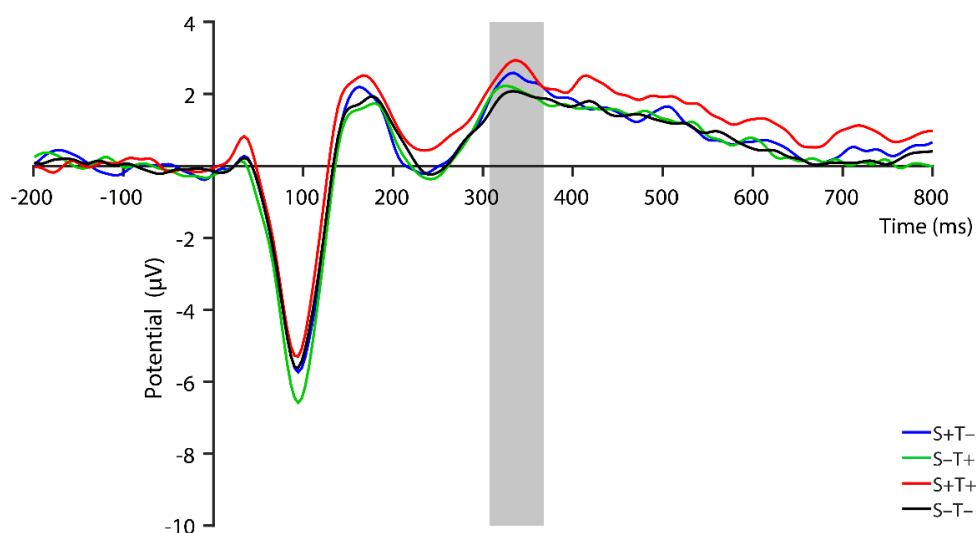
Rysunek 15. Topografia komponentu N1 (80-108 ms) mierzonego w eksperymencie I (prosta scena akustyczna, zasada częstotliwości).

## Komponent N2:

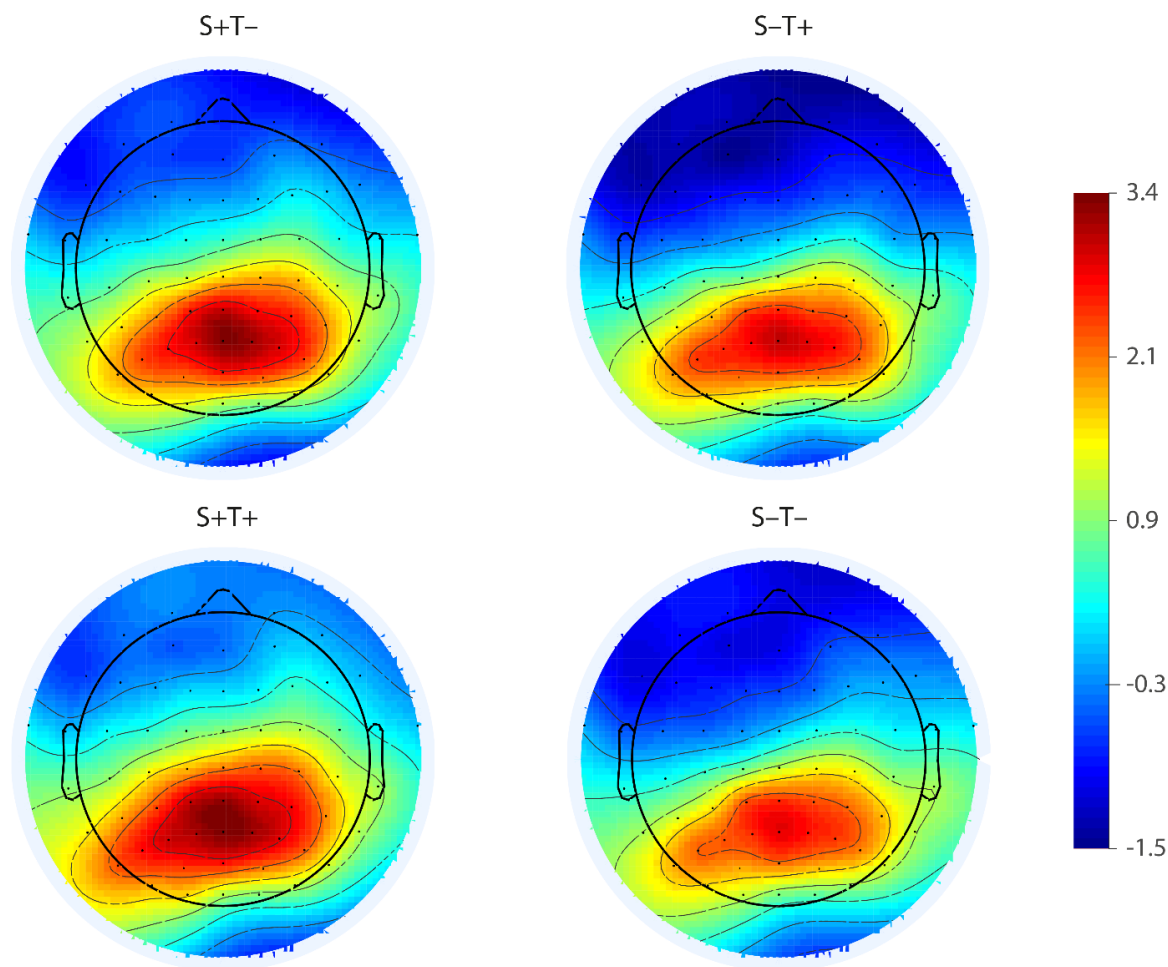
ANOVA wykazała brak istotnych różnic na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3, 54) = 1,24$ ;  $p > 0,05$  oraz interakcji pomiędzy warunkiem eksperymentalnym a elektrodą,  $F(4,44; 79,82) = 1,35$ ;  $p > 0,05$ . Pojawił się natomiast efekt elektrody,  $F(1,56; 28,06) = 13,94$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,44$ , który świadczy o specyficznej dystrybucji komponentu N2 (która nie jest jednak różnicowana między warunkami przewidywalności).

## Komponent P3:

ANOVA wykazała różnice na poziomie tendencji statystycznej na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3; 54) = 2,32$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,09$ , a także istotne różnice na poziomie elektrody,  $F(2,92; 52,59) = 11,66$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,39$ . Interakcja między warunkiem eksperymentalnym a elektrodą okazała się natomiast nieistotna,  $F(6,07; 109,22) = 1,42$ ;  $p > 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,07$ . Analiza kontrastów prostych dla warunku eksperymentalnego wykazała, że tylko warunek czasowo-przestrzenny różni się od warunku braku przewidywalności w zakresie amplitudy komponentu P3,  $F(1, 18) = 7,31$ ;  $p < 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,29$ . P3 w przypadku warunku czasowo-przestrzennego było istotnie wyższe ( $M = 2,24 \mu\text{V}$ ; s.e. =  $0,48 \mu\text{V}$ ) w porównaniu do warunku braku przewidywalności ( $M = 1,57 \mu\text{V}$ ; s.e. =  $0,39 \mu\text{V}$ ).



Rysunek 16. Amplituda komponentu P3 (308-368 ms) mierzonego w eksperymencie I (prosta scena akustyczna, zasada częstości).



Rysunek 17. Topografia komponentu P3 (308-368 ms) mierzonego w eksperymencie I (prosta scena akustyczna, zasada częstości).

### 5.1.3. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu zaobserwowano, że na poziomie behawioralnym osoby badane wykonywały zadanie szybciej w przypadku warunku czasowo-przestrzennego w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Po drugie na poziomie elektrofizjologicznym różnice między warunkami eksperymentalnymi wystąpiły dla amplitudy komponentów N1 i P3. W warunku czasowym amplituda komponentu N1 była wyższa w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Różnice między warunkami eksperymentalnymi wystąpiły także na poziomie komponentu P3. W warunku czasowo-przestrzennym wartość amplitudy komponentu P3 była istotnie wyższa w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Nie zaobserwowano natomiast efektu różnic między warunkami eksperymentalnymi dla wielkości amplitud komponentów P1 i N2.

## 5.2. Eksperyment II: zasada przewidywalnej kolejności – prosta scena akustyczna

### 5.2.1. Wyniki behawioralne

Analiza przeciętnej poprawności wykonania zadania przez uczestników grupy eksperymentalnej wykazała wyniki wyższe od poziomu losowego (50%) dla każdego z bloków (warunków): przestrzennego ( $M = 88,73\%$ ;  $SD = 11,10\%$ ), czasowego ( $M = 86,54\%$ ;  $SD = 18,31\%$ ), czasowo-przestrzennego ( $M = 90,48\%$ ;  $SD = 8,08\%$ ) i nieprzewidywalnego ( $M = 89,96\%$ ;  $SD = 8,17\%$ ).

Analiza efektów wewnątrzobjektowych (przy spełnionym założeniu sferyczności:  $W$  Mauchly = 0,61;  $\chi^2 = 8,87$ ;  $df = 5$ ;  $p > 0,05$ ) nie wykazała istnienia istotnych różnic pomiędzy warunkami eksperymentalnymi ze względu na czas wykonania zadania dyskryminacji,  $F(3, 57) = 0,19$ ;  $p > 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,01$ .

### 5.2.2. Wyniki badań ERP

W pierwszej kolejności zweryfikowano istnienie testowanych komponentów (P1, N1, N2 i P3) dla poszczególnych warunków eksperymentalnych w oparciu o test  $t$  dla jednej próby (kryterium jest wartość amplitudy  $\mu V = 0$ ), przy wykorzystaniu reprezentatywnych elektrod (Fz dla komponentów: P1, N1, N2 oraz Pz dla komponentu P3). Jeśli komponent nie występował dla żadnego z warunków, to nie podejmowano dla niego dalszej analizy.

Tabela 4

*Test t dla jednej próby weryfikujący obecność komponentów: P1, N1, N2 i P3 dla eksperymentu II*

Warunek	P1 (Fz)	N1(Fz)	N2(Fz)	P3 (Pz)
S+T-	0,67 (0,79)**	-7,92 (3,14)***	-1,89 (3,23)*	3,55 (4,31)**
S-T+	0,90 (0,77)***	-7,27 (3,15)***	-1,65 (3,02)*	3,60 (3,73)***
S+T+	0,89 (0,83)***	-7,80 (3,33)***	-2,15 (3,66)*	3,30 (3,59)***
S-T-	0,83 (1,00)**	-7,01 (2,97)***	-2,20 (3,16)**	3,58 (4,12)***

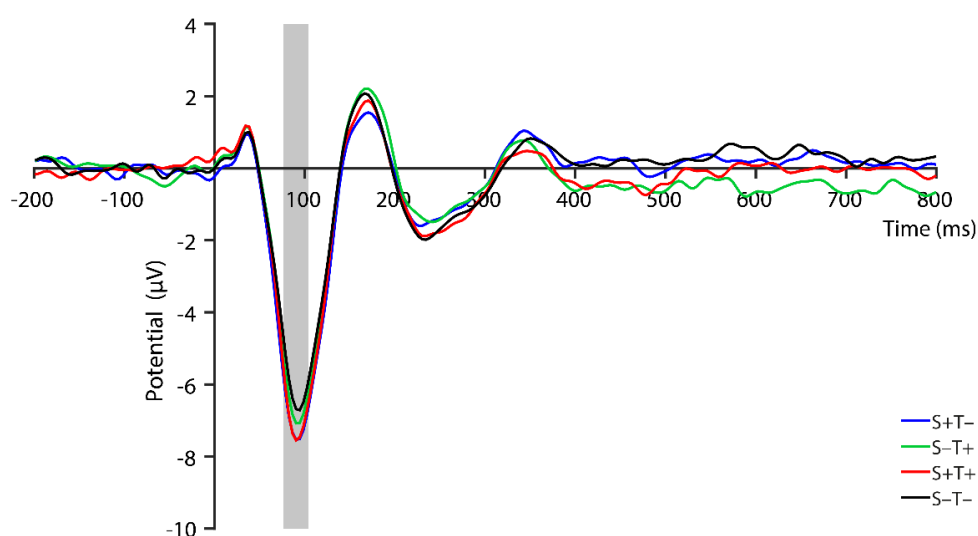
\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$

## Komponent P1

ANOVA wykazała brak istotnych różnic na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3, 57) = 0,60$ ;  $p > 0,05$  oraz interakcji pomiędzy warunkiem eksperymentalnym a elektrodą,  $F(5,94; 112,76) = 0,66$ ;  $p > 0,05$ . Pojawił się natomiast efekt elektrody,  $F(1,94; 36,84) = 5,53$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,23$ , który świadczy o specyficznej dystrybucji komponentu P1 (która nie jest jednak różnicowana między warunkami przewidywalności).

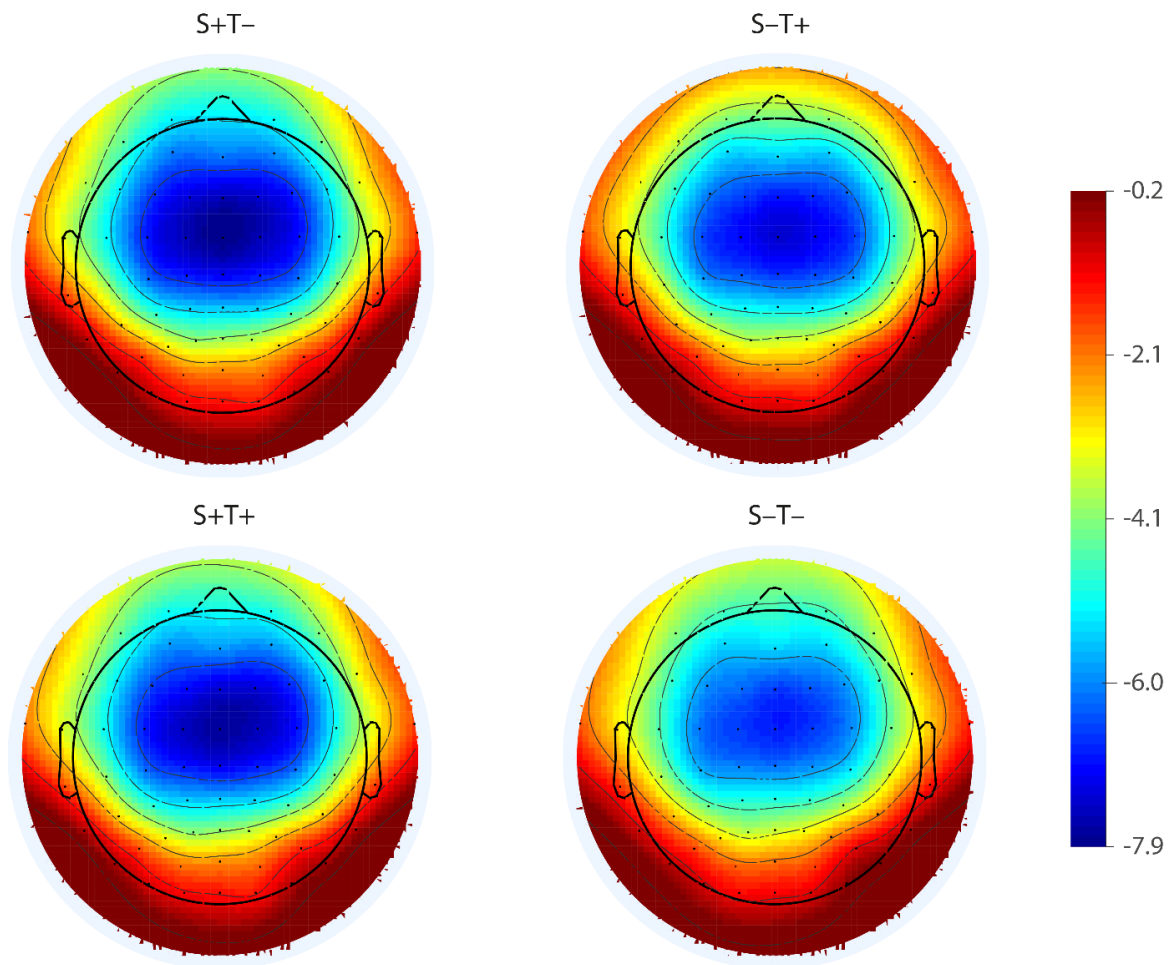
## Komponent N1

ANOVA wykazała istotne różnice zarówno na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3; 57) = 4,20$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,18$ , jak i elektrody,  $F(3,03; 57,65) = 11,56$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,38$ . Interakcja między warunkiem eksperymentalnym a elektrodą okazała się natomiast nieistotna,  $F(5,12; 97,25) = 1,42$ ;  $p > 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,07$ . Analiza kontrastów prostych dla warunku eksperymentalnego wykazała, że zarówno warunek przestrzenny,  $F(1, 19) = 10,43$ ;  $p < 0,01$ ;  $\eta^2 = 0,35$ , jak i czasowo-przestrzenny,  $F(1, 19) = 8,14$ ;  $p < 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,30$ , różnią się od warunku braku przewidywalności w zakresie amplitudy komponentu N1. N1 w przypadku warunku przestrzennego ( $M = -7,21 \mu\text{V}$ ; s.e. =  $0,56 \mu\text{V}$ ), a także czasowo-przestrzennego ( $M = -7,23 \mu\text{V}$ ; s.e. =  $0,61 \mu\text{V}$ ) było istotnie niższe w porównaniu do warunku braku przewidywalności ( $M = -6,40 \mu\text{V}$ ; s.e. =  $0,56 \mu\text{V}$ ).



Rysunek 18. Amplituda komponentu N1 (76-104 ms) mierzonego w eksperymencie II (prosta scena akustyczna, zasada kolejności).





Rysunek 19. Topografia komponentu N1 (76-104 ms) mierzonego w eksperymencie II (prosta scena akustyczna, zasada kolejności).

### Komponent N2

ANOVA wykazała brak istotnych różnic na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3, 57) = 0,59$ ;  $p > 0,05$  oraz interakcji pomiędzy warunkiem eksperymentalnym a elektrodą,  $F(2,90; 55,11) = 0,86$ ;  $p > 0,05$ . Pojawił się natomiast efekt elektrody,  $F(1,64; 31,12) = 10,55$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,36$ , który świadczy o specyficznej dystrybucji komponentu N2 (która nie jest jednak różnicowana między warunkami przewidywalności).

### Komponent P3

ANOVA wykazała brak istotnych różnic na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(2,24; 42,48) = 0,51$ ;  $p > 0,05$ , oraz interakcji pomiędzy warunkiem eksperymentalnym a elektrodą,  $F(4,38; 83,29) = 0,57$ ;  $p > 0,05$ . Pojawił się natomiast efekt

elektrody,  $F(2,23; 42,44) = 15,90$ ;  $p < 0,001$ ;  $\eta^2 = 0,46$ , który świadczy o specyficznej dystrybucji komponentu P3 (która nie jest jednak różnicowana między warunkami przewidywalności).

### **5.2.3. Podsumowanie**

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu zaobserwowano, że na poziomie elektrofizjologicznym w warunku przestrzennym oraz czasowo-przestrzennym amplituda komponentu N1 była wyższa w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Nie zaobserwowano natomiast efektu różnic między warunkami eksperymentalnymi na poziomie behawioralnym. Nie zaobserwowano także efektu różnic między warunkami eksperymentalnymi dla wielkości amplitud komponentów P1, N2 i P3.

## **5.3. Eksperyment III: zasada częstości – złożona scena akustyczna**

### **5.3.1. Wyniki behawioralne**

Analiza przeciętnej poprawności wykonania zadania przez uczestników grupy eksperymentalnej wykazała wyniki wyższe od poziomu losowego (50%) dla każdego z bloków (warunków): przestrzennego ( $M = 89,19\%$ ;  $SD = 10,00\%$ ), czasowego ( $M = 88,68\%$ ;  $SD = 12,72\%$ ), czasowo-przestrzennego ( $M = 89,67\%$ ;  $SD = 11,15\%$ ) i nieprzewidywalnego ( $M = 91,01\%$ ;  $SD = 7,44\%$ ).

Analiza efektów wewnątrzobiektywnych (przy spełnionym założeniu sferyczności:  $W$  Mauchly = 0,78;  $\chi^2 = 4,13$ ;  $df = 5$ ;  $p > 0,05$ ) wykazała istnienie istotnych różnic pomiędzy warunkami eksperymentalnymi ze względu na czas wykonania zadania dyskryminacji,  $F(3, 54) = 3,48$ ;  $p < 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,16$ . Analiza kontrastów wykazała, że czas wykonania był istotnie szybszy,  $F(1, 18) = 6,60$ ;  $p < 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,27$ , tylko w przypadku warunku czasowego ( $M = 0,58$  ms;  $SD = 0,01$  ms) w porównaniu do warunku braku przewidywalności ( $M = 0,60$  ms;  $SD = 0,01$  ms).

### **5.3.2. Wyniki badań ERP**

W pierwszej kolejności zweryfikowano istnienie testowanych komponentów (P1, N1, N2 i P3) dla poszczególnych warunków eksperymentalnych w oparciu o test  $t$  dla jednej próby (kryterium jest wartość amplitudy  $\mu V = 0$ ), przy wykorzystaniu reprezentatywnych elektrod (Fz dla komponentów: P1, N1, N2 oraz Pz dla komponentu

P3). Jeśli komponent nie występował dla żadnego z warunków, to nie podejmowano dla niego dalszej analizy.

Tabela 5

*Test t dla jednej próby weryfikujący obecność komponentów: P1, N1, N2 i P3 dla eksperymentu III*

Warunek	P1 (Fz)	N1(Fz)	N2(Fz)	P3 (Pz)
S+T-	0,09 (1,37)	-5,31 (3,67)***	-2,49 (4,21)*	3,04 (2,17)***
S-T+	-0,02 (1,88)	-5,72 (4,37)***	-2,34 (3,98)*	3,37 (2,04)***
S+T+	-0,06 (1,55)	-5,15 (3,65)***	-1,77 (3,25)*	3,49 (2,00)***
S-T-	0,37 (1,18)	-4,82 (3,35)***	-2,08 (3,59)*	2,97 (1,68)***

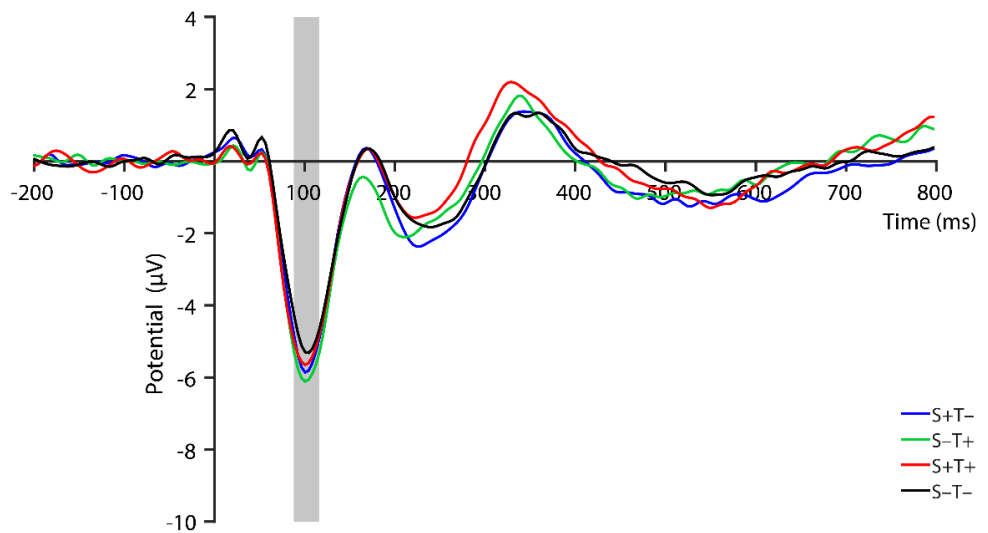
\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$

### **Komponent P1:**

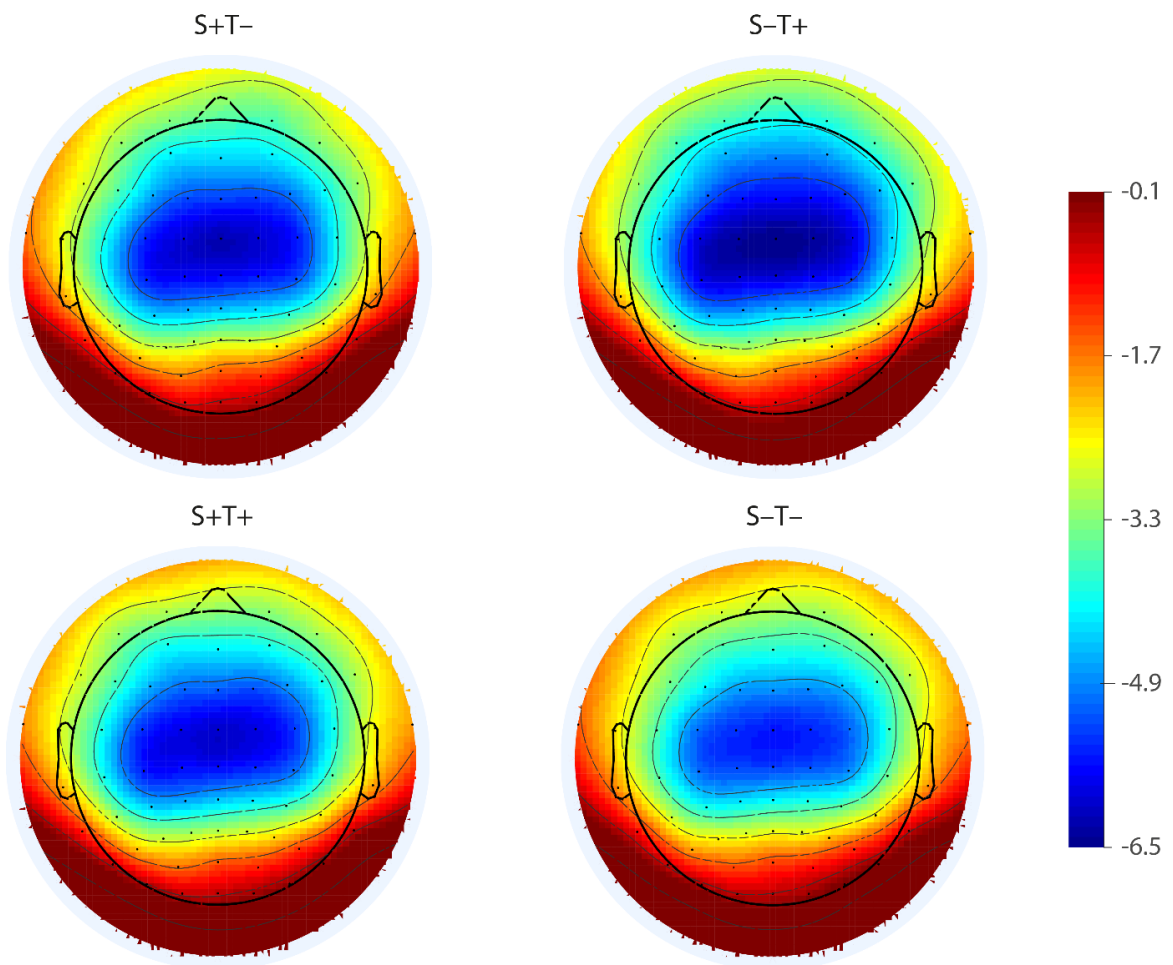
Komponent nie występował dla żadnego z warunków eksperymentalnych, dlatego nie podejmowano dla niego dalszej analizy.

### **Komponent N1:**

ANOVA wykazała istotne statystycznie różnice wyłącznie na poziomie elektrody,  $F(2,99; 53,90) = 8,15; p < 0,001; \eta^2 = 0,31$ . Efekt główny wymiaru przewidywalności oraz interakcja okazały się natomiast nieistotne. Mimo braku efektu głównego warunku eksperymentalnego możliwe było przeprowadzenie analizy kontrastów – ze względu na ich wcześniejsze zaplanowanie na poziomie sformułowanych hipotez (Hsu, 1996). Analiza kontrastów prostych dla warunku eksperymentalnego wykazała, że warunek czasowy,  $F(1, 19) = 8,05; p < 0,05; \eta^2 = 0,30$ , a także przestrzenny,  $F(1,18) = 4,74; p < 0,05; \eta^2 = 0,21$  różną się od warunku braku przewidywalności w zakresie amplitudy komponentu N1. N1 w przypadku warunku czasowego ( $M = -5,76 \mu V; s.e. = 0,94 \mu V$ ) oraz przestrzennego ( $M = -5,43 \mu V; s.e. = 0,83 \mu V$ ) było istotnie niższe w porównaniu do warunku braku przewidywalności ( $M = -4,95 \mu V; s.e. = 0,76 \mu V$ ).



Rysunek 20. Amplituda komponentu N1 (88-116 ms) mierzonego w eksperymencie III (złożona scena akustyczna, zasada częstotliwości).



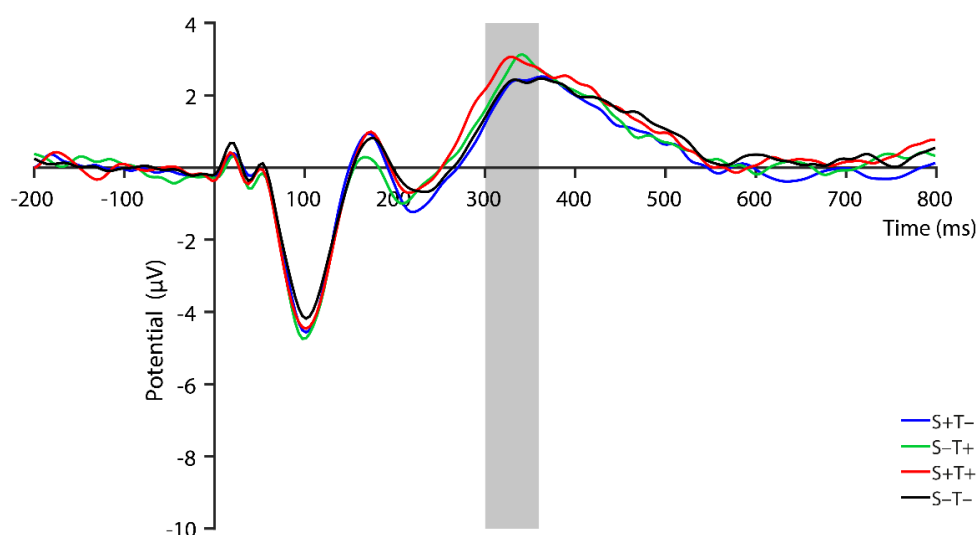
Rysunek 21. Topografia komponentu N1 (88-116 ms) mierzonego w eksperymencie III (złożona scena akustyczna, zasada częstotliwości).

### Komponent N2:

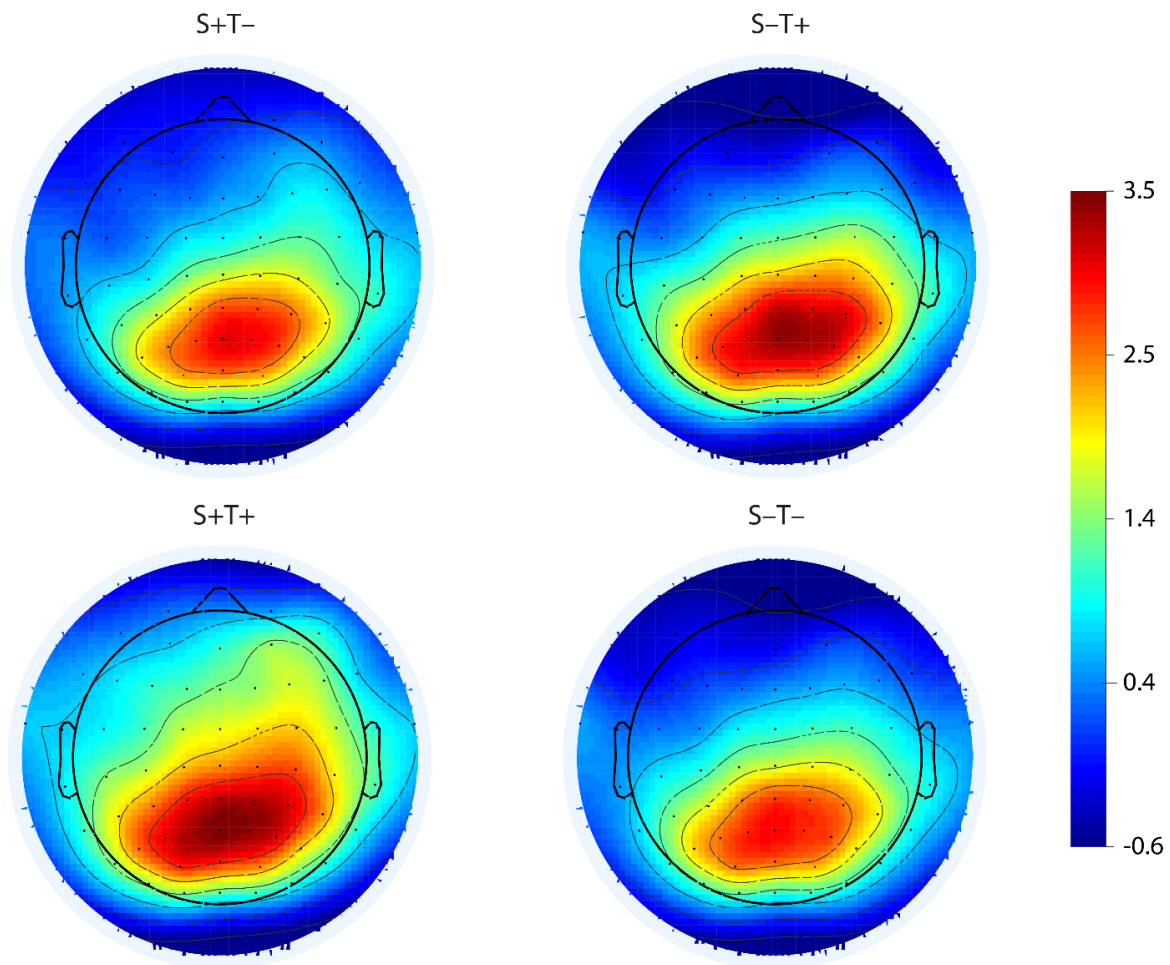
ANOVA wykazała brak istotnych różnic na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3; 54) = 1,54; p > 0,05$  oraz interakcji pomiędzy warunkiem eksperymentalnym a elektrodą,  $F(2,84; 51,14) = 1,04; p > 0,05$ . Pojawił się natomiast efekt elektrody,  $F(1,81; 32,61) = 7,54; p < 0,01; \eta^2 = 0,30$ , który świadczy o specyficznej dystrybucji komponentu N2 (która nie jest jednak różnicowana między warunkami przewidywalności).

### Komponent P3:

ANOVA wykazała różnice statystyczne dla efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(2,04; 36,74) = 3,24; p < 0,05; \eta^2 = 0,15$ , a także istotne różnice na poziomie elektrody,  $F(1,95; 35,12) = 5,20; p < 0,05; \eta^2 = 0,22$ . Interakcja między warunkiem eksperymentalnym a elektrodą okazała się natomiast nieistotna,  $F(4,19; 75,46) = 0,68; p > 0,05; \eta^2 = 0,04$ . Analiza kontrastów prostych dla przewidywalności wykazała, że zarówno warunek czasowy,  $F(1, 18) = 5,03; p < 0,05; \eta^2 = 0,22$ , jak i czasowo-przestrzenny,  $F(1, 18) = 10,43; p < 0,01; \eta^2 = 0,37$ , różnią się od warunku braku przewidywalności w zakresie amplitudy komponentu P3. P3 w przypadku warunku czasowego ( $M = 2,63 \mu V; s.e. = 0,58 \mu V$ ), a także czasowo-przestrzennego ( $M = 2,81 \mu V; s.e. = 0,53 \mu V$ ), było istotnie wyższe w porównaniu do warunku braku przewidywalności ( $M = 2,22 \mu V; s.e. = 0,47 \mu V$ ).



Rysunek 22. Amplituda komponentu P3 (300-360 ms) mierzonego w eksperymencie III (złożona scena akustyczna, zasada częstości).



Rysunek 23. Topografia komponentu P3 (300-360 ms) mierzonego w eksperymencie III (złożona scena akustyczna, zasada częstości).

### 5.3.3. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu zaobserwowano, że na poziomie behawioralnym osoby badane wykonywały zadanie szybciej w przypadku warunku czasowego w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Po drugie na poziomie elektrofizjologicznym różnice między warunkami eksperymentalnymi wystąpiły dla amplitudy komponentów N1 i P3. W dwóch warunkach: czasowym i przestrzennym amplituda komponentu N1 była wyższa w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Różnice między warunkami eksperymentalnymi wystąpiły także na poziomie komponentu P3. Zarówno w warunku czasowym, jak i czasowo-przestrzennym wartość amplitudy komponentu P3 była istotnie wyższa w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Nie zaobserwowano natomiast efektu różnic między warunkami eksperymentalnymi dla wielkości amplitud komponentów P1 i N2.

## 5.4. Eksperyment IV: złożona scena akustyczna i zasada kolejności

### 5.4.1. Wyniki behawioralne

Analiza przeciętnej poprawności wykonania zadania przez uczestników grupy eksperymentalnej wykazała wyniki wyższe od poziomu losowego (50%) dla każdego z bloków (warunków): przestrzennego ( $M = 86,32\%$ ;  $SD = 16,12\%$ ), czasowego ( $M = 86,67\%$ ;  $SD = 17,33\%$ ), czasowo-przestrzennego ( $M = 87,13\%$ ;  $SD = 12,56\%$ ) i nieprzewidywalnego ( $M = 86,01\%$ ;  $SD = 16,10\%$ ).

Analiza efektów wewnątrzbielkowych (przy spełnionym założeniu sferyczności:  $W$  Mauchly = 0,60;  $\chi^2 = 9,09$ ;  $df = 5$ ;  $p > 0,05$ ) nie wykazała istnienia istotnych statystycznie różnic pomiędzy warunkami eksperymentalnymi ze względu na czas wykonania zadania dyskryminacji,  $F(3, 57) = 0,11$ ;  $p > 0,05$ ;  $\eta^2 = 0,01$ .

### 5.4.2. Wyniki badań ERP

W pierwszej kolejności zweryfikowano istnienie testowanych komponentów (P1, N1, N2 i P3) dla poszczególnych warunków eksperymentalnych w oparciu o test  $t$  dla jednej próby (kryterium jest wartość amplitudy  $\mu V = 0$ ), przy wykorzystaniu reprezentatywnych elektrod (Fz dla komponentów: P1, N1, N2 oraz Pz dla komponentu P3). Jeśli komponent nie występował dla żadnego z warunków, to nie podejmowano dla niego dalszej analizy.

Tabela 6

*Test t dla jednej próby weryfikujący obecność komponentów: P1, N1, N2 i P3 dla eksperymentu IV*

Warunek	P1 (Fz)	N1(Fz)	N2(Fz)	P3 (Pz)
S+T-	0,54 (1,27)*	-4,15 (2,88)***	-2,66 (3,93)**	2,80 (1,64)***
S-T+	0,71 (1,67)*	-3,60 (2,50)***	-1,82 (3,12)**	2,66 (1,82)***
S+T+	0,60 (1,73)	-4,02 (2,87)***	-2,20 (4,01)*	2,60 (1,87)***
S-T-	0,71 (1,73)*	-3,48 (2,61)***	0,23 (1,35)	2,55 (1,76)***

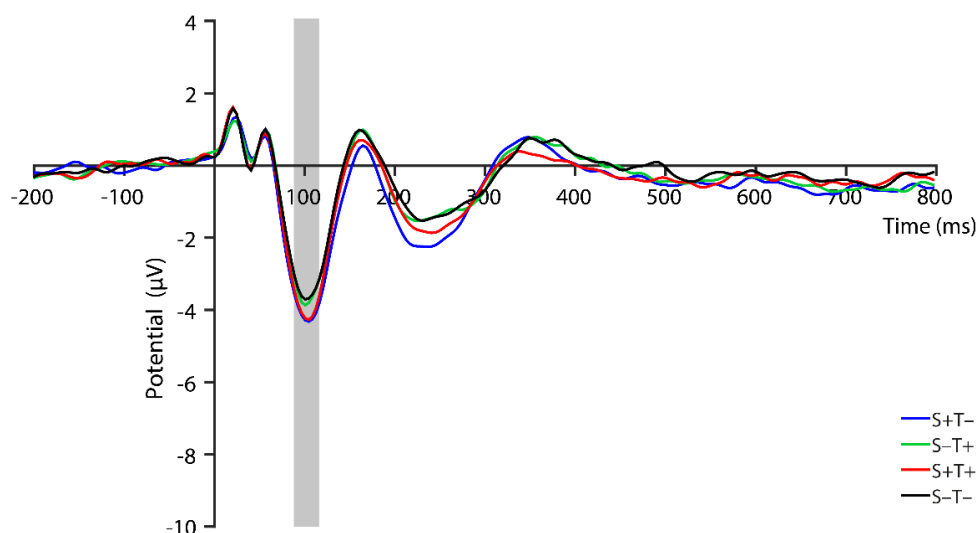
\*  $p < 0,05$ ; \*\*  $p < 0,01$ ; \*\*\*  $p < 0,001$

### Komponent P1:

ANOVA wykazała brak istotnych różnic na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3; 57) = 0,25; p > 0,05$  oraz interakcji pomiędzy warunkiem eksperymentalnym a elektrodą,  $F(5,86; 111,33) = 0,64; p > 0,05$ . Pojawił się natomiast efekt elektrody,  $F(2,92; 55,51) = 4,26; p < 0,01; \eta^2 = 0,18$ , który świadczy o specyficznej dystrybucji komponentu P1 (która nie jest jednak różnicowana między warunkami przewidywalności)

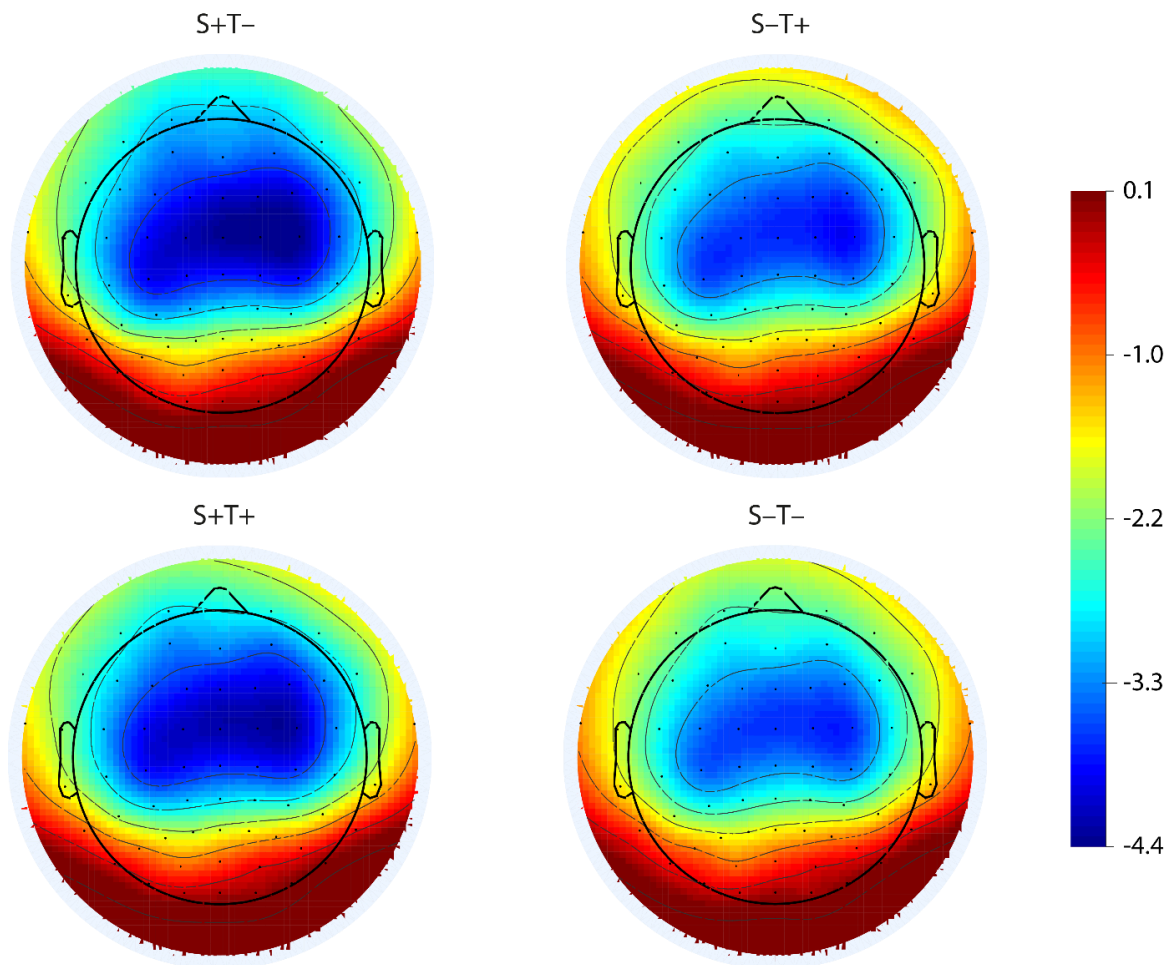
### Komponent N1:

ANOVA wykazała istotne różnice zarówno na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3; 57) = 3,49; p < 0,05; \eta^2 = 0,16$ , jak i elektrody,  $F(3,37; 63,93) = 3,64; p < 0,05; \eta^2 = 0,16$ . Interakcja między warunkiem eksperymentalnym a elektrodą okazała się natomiast nieistotna,  $F(7,13; 135,49) = 0,91; p > 0,05; \eta^2 = 0,05$ . Analiza kontrastów prostych dla warunku eksperymentalnego wykazała, że zarówno warunek przestrzenny,  $F(1, 19) = 7,97; p < 0,05; \eta^2 = 0,30$ , jak i czasowo-przestrzenny,  $F(1, 19) = 8,14; p < 0,05; \eta^2 = 0,26$ , różnią się od warunku braku przewidywalności w zakresie amplitudy komponentu N1. N1 w przypadku warunku przestrzennego ( $M = -4,02 \mu V$ ; s.e. =  $0,60 \mu V$ ), a także czasowo-przestrzennego ( $M = -3,92 \mu V$ ; s.e. =  $0,59 \mu V$ ) było istotnie niższe w porównaniu do warunku braku przewidywalności ( $M = -3,42 \mu V$ ; s.e. =  $0,55 \mu V$ ).



Rysunek 24. Amplituda komponentu N1 (88-116 ms) mierzonego w eksperymencie IV (złożona scena akustyczna, zasada kolejności).

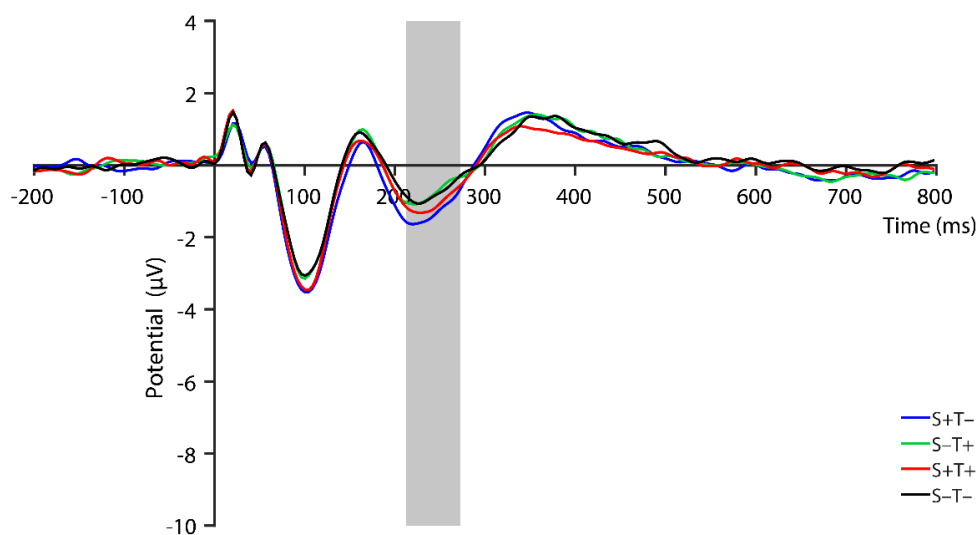




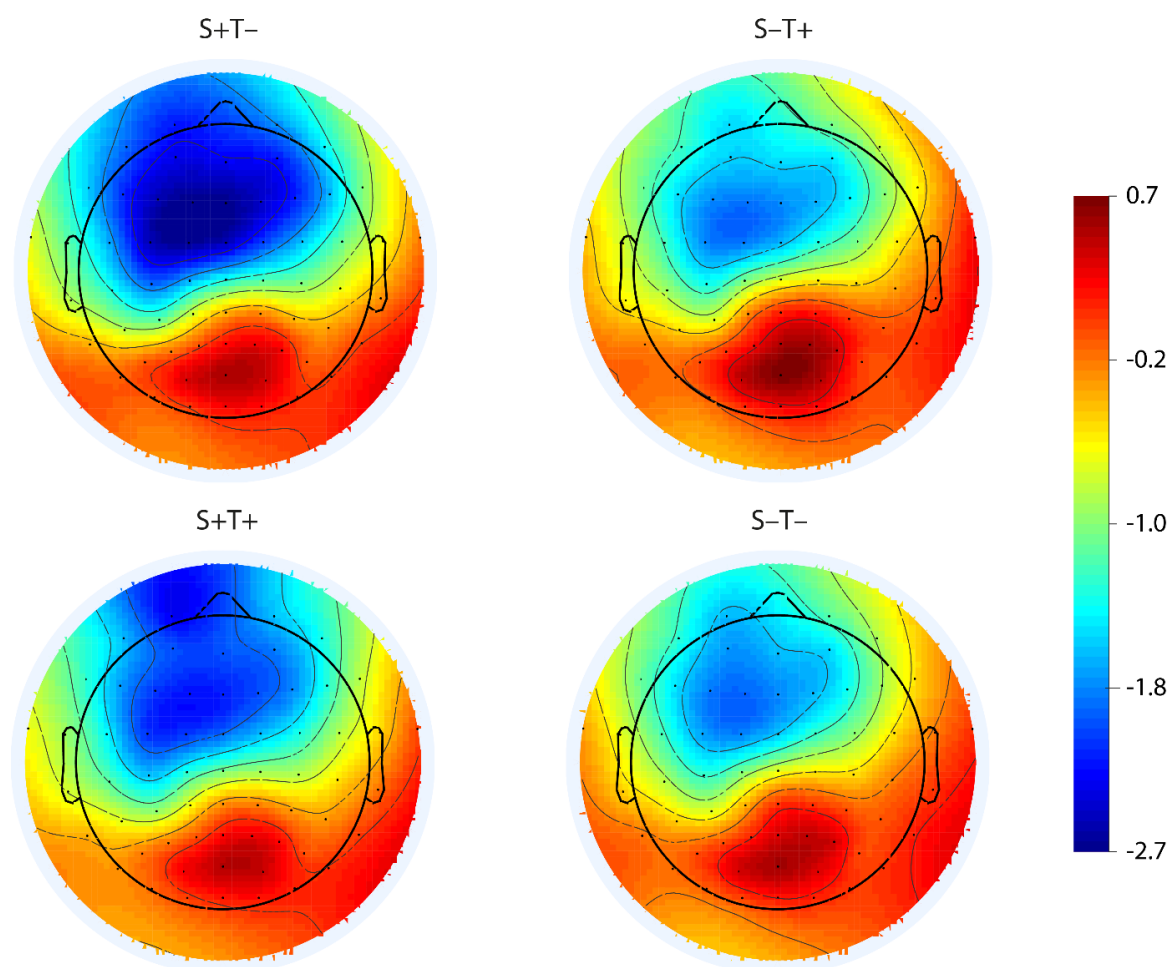
Rysunek 25. Topografia komponentu N1 (88-116 ms) mierzonego w eksperymencie IV (złożona scena akustyczna, zasada kolejności).

### Komponent N2:

ANOVA wykazała istotne różnice zarówno na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3; 57) = 3,15; p < 0,05; \eta^2 = 0,14$ , jak i elektrody,  $F(1,55; 29,37) = 9,04; p < 0,01; \eta^2 = 0,32$ . Interakcja między warunkiem eksperymentalnym a elektrodą okazała się natomiast nieistotna,  $F(3,56; 67,62) = 1,82; p > 0,05; \eta^2 = 0,09$ . Analiza kontrastów prostych dla warunku eksperymentalnego wykazała, że warunek przestrzenny,  $F(1, 19) = 6,92; p < 0,05; \eta^2 = 0,27$ , różni się od warunku braku przewidywalności w zakresie amplitudy komponentu N2. N2 w przypadku warunku przestrzennego ( $M = -1,31 \mu V; s.e. = 0,57 \mu V$ ) było istotnie niższe w porównaniu do warunku braku przewidywalności ( $M = -0,79 \mu V; s.e. = 0,54 \mu V$ ).



Rysunek 26. Amplituda komponentu N2 (212-272 ms) mierzonego w eksperymencie IV (złożona scena akustyczna, zasada kolejności).



Rysunek 27. Topografia komponentu N2 (212-272 ms) mierzonego w eksperymencie IV (złożona scena akustyczna, zasada kolejności).

### **Komponent P3:**

ANOVA wykazała brak istotnych różnic na poziomie efektu głównego warunku eksperymentalnego,  $F(3; 57) = 0,58; p > 0,05$ , oraz interakcji pomiędzy warunkiem eksperymentalnym a elektrodą,  $F(4,37; 82,93) = 1,30; p > 0,05$ . Pojawił się natomiast efekt elektrody,  $F(2,37; 45,10) = 7,93; p < 0,001; \eta^2 = 0,29$ , który świadczy o specyficznej dystrybucji komponentu P3 (która nie jest jednak różnicowana między warunkami przewidywalności).

#### **5.4.3. Podsumowanie**

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu zaobserwowano, że na poziomie elektrofizjologicznym w warunku przestrzennym oraz czasowo-przestrzennym amplituda komponentu N1 była wyższa w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Efekt różnic między warunkami eksperymentalnymi wystąpił także ze względu na amplitudę komponentu N2. Warunek przestrzenny cechował się istotnie wyższą wartością amplitudy komponentu N2 w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Nie zaobserwowano natomiast efektu różnic między warunkami eksperymentalnymi na poziomie behawioralnym. Nie zaobserwowano także efektu różnic między warunkami eksperymentalnymi dla wielkości amplitud komponentów P1 i P3.

## **6. Dyskusja**

### **6.1. Eksperyment I**

Wyniki eksperymentu I potwierdzają hipotezy H1, H2 i H9. W przypadku czasów reakcji istotny efekt został zaobserwowany wyłącznie dla warunku czasowo-przestrzennego, który cechował się skróceniem czasu wykonania zadania w porównaniu do warunku braku przewidywalności (H1). Na wczesnym etapie przetwarzania tylko w przypadku warunku czasowego zaobserwowano wyższą amplitudę komponentu N1 w porównaniu do warunku braku przewidywalności (H2). Wartość amplitudy komponentu P3 była z kolei wyższa dla warunku czasowo-przestrzennego w porównaniu do warunku braku przewidywalności (H9).

W literaturze często obserwuje się wzrost szybkości wykonania zarówno dla przewidywalnego czasu, jak i przewidywalnego czasu i miejsca pojawienia się bodźca (Beck i in., 2014; Lange i in., 2006; Rimmele i in., 2011). W niniejszym badaniu efekt

pojawił się wyłącznie dla interakcji obu typów przewidywalności w warunkach czasowo-przestrzennych. Pojedyncze efekty w warunkach czasowych lub przestrzennych nie były obserwowane. Ze względu na manipulację prawdopodobieństwem globalnym (dotyczącym lokalizacji lub interwałów) z losowym charakterem prawdopodobieństw lokalnych dotyczących cech każdego z dźwięków z osobna, zniesienia efektu nie można upatrywać w konflikcie obu powyższych prawdopodobieństw (Bendixen, 2014). Choć wskazówki probabilistyczne: przestrzenna i czasowa informowały kolejno o najbardziej prawdopodobnej lokalizacji i czasie pojawienia się bodźca, to możliwe jest, że zadanie dyskryminacji ze względu na cechę bodźca (dźwięk prosty vs. dźwięk złożony) nie angażowało użycia powyższych informacji do rozwiązania zadania. Choć izolowany dźwięk (pozbawiony tła) w sposób oddolny ukierunkowywał uwagę osób, a oczekiwania wypracowane na podstawie uczenia zasady częstości miały pozwalać wykonać zadanie efektywniej, to efektywność zaobserwowano wyłącznie dla warunków czasowo-przestrzennych. Być może oba te wymiary (czas i przestrzeń) mogą działać w sposób synergistyczny, dając efekt wyższy niż suma składowych wprowadzanych pojedynczo (Chennu i in., 2013; Fu i in., 2020).

Co ciekawe, tylko w przypadku przewidywalności czasowej zaobserwować można było zwiększenie komponentu N1, co zgodne jest z obserwacją zespołu Rimmele i in. (2011). Zaobserwowany efekt wpisuje się w dyskusję nt. związku potencjału N1 z przewidywalnością, w świetle której powinna ona raczej osłabiać niż wzmacniać wielkość jego amplitudy. W literaturze obserwuje się jednak niejednokrotnie zwiększone odpowiedzi na bodźce oczekiwane (Doherty i in., 2005; Lange, 2013; Rimmele i in., 2011; Tervaniemi i in., 1994), które można przypisać modulacji uwagi. Ostatnie badania, a także wkład płynący ze stale rozwijającej się Teorii Kodowania Predykcyjnego, precyzują rozbieżności dotyczące odmiennego wpływu predykcji i uwagi na N1. Rozbieżności te można pogodzić, jeśli potraktujemy predykcję i uwagę jako dwie formy wnioskowania percepcyjnego, które działają w sposób synergistyczny.

Wnioskowanie percepcyjne jest, z perspektywy kodowania predykcyjnego, rozumiane jako iteracyjny proces minimalizacji błędów predykcji. Wewnętrzne modele wejścia sensorycznego (a więc i generowane przez nie predykcje) są tylko jego bardziej lub mniej dokładnymi aproksymacjami. Dokładniejsze przybliżenie prowadzi do mniejszego błędów predykcji. Biorąc pod uwagę, że środowisko zewnętrzne i nasze mózgi są z natury hałaśliwe, jest bardzo mało prawdopodobne, aby błędy predykcji były

równe zero (Hohwy, 2013). Jak argumentuje Hohwy (2013): „Heurystycznie rzecz biorąc, model, który idealnie pasuje do danych, sam w sobie jest wysoce nieprawdopodobny, ponieważ narusza nasze wcześniejsze (aprioryczne) przekonania, że szum jest zawsze większy od zera” (s. 45). Dlatego też dodatkowym celem wnioskowania percepcyjnego jest poprawne oszacowanie poziomu szumu, czyli zmienności sygnału (którego odwrotność jest równa jego precyzji). Wewnętrzny model generatywny jest więc zaangażowany w dwa rodzaje wnioskowania wykonywanego jednocześnie: wnioskowanie o treści błędu predykcji (sygnału sensorycznego) oraz wnioskowanie o oczekiwanej precyzji błędu predykcji, czyli jego zmienności. Według Hohwy (2012, 2013) można je metaforycznie rozumieć jako wnioskowanie statystyczne pierwszego rzędu (podobne do szacowania średniej) i wnioskowanie statystyczne drugiego rzędu (podobne do szacowania wariancji). Ten drugi typ wnioskowania związany jest z uwagą, gdyż uwaga rozumiana jest jako mechanizm ważenia precyzji, który reguluje przyrost błędu predykcji. Te dwa typy wnioskowania są ze sobą nieodłącznie związane, sygnały błędów predykcji są modulowane przez ich oczekiwaną precyzję. Ze schematu tego wynika, że wzmocnienie błędu predykcji może być większe dla przewidywanych (bardziej prawdopodobnych) danych wejściowych, ponieważ oczekuje się, że przewidywane dane wejściowe będą bardziej precyzyjne.

Badanie Kok i in. (2012) wykorzystujące funkcjonalny rezonans magnetyczny dostarcza dowodów na poparcie tej hipotezy. Odpowiedź zależna od poziomu natlenienia krwi (ang. *Blood Oxygenation Level Dependent signal*; BOLD) była tłumiona dla przewidywalnych w porównaniu z nieprzewidywalnymi kratkami, gdy były one nieistotne dla zadania, co jest zgodne z hipotezą, że błąd przewidywania jest wyciszony dla danych wyjaśnionych. Wzorzec odpowiedzi był jednak odwrócony, gdy kratki były istotne dla zadania: odpowiedź zależna od poziomu utlenowania krwi była wzmocniona dla gratyfikacji przewidywanych i istotnych dla zadania. Podsumowując, wzmocnienie odpowiedzi przez mechanizm precyzyjnego ważenia uwagi wydaje się być zależne od przewidywalności, ponieważ przewidywalne kratki otrzymują większe wzmocnienie. Jak zatem interpretować wzmocnienie komponentu N1 zaobserwowane dla warunku czasowego w porównaniu do warunku braku przewidywalności w niniejszym eksperymencie? Wzmocnienie to może oznaczać, że przewidywalność w wymiarze czasowym wpłynęła na mechanizm ważenia uwagowego – przewidywalne interwały otrzymały większe wzmocnienie.

Wzrost amplitudy komponentu P3 dla przewidywalności czasowo-przestrzennej zgodny jest z interpretacjami dotyczącymi przetwarzania związanego z integracją wielu typów informacji celem efektywnego procesu ewaluacji, aktualizacji kontekstu czy procesów kontroli (Donchin i Coles, 1988; Friedman i in., 2001; Kutas i in., 1977; Verleger, 1988). Lange (2012) zaobserwowała, że komponent P3 często współwystępuje z motorycznym przygotowaniem, które wyrazić można m. in. za pomocą czasów wykonania zadania. Uzyskany efekt dotyczył jednak przewidywalności czasowej (w eksperymencie nie uwzględniano warunku przestrzennego), natomiast w niniejszym opracowaniu facylitacja dotyczy przewidywalności czasowo-przestrzennej. Zgodna natomiast jest obserwacja dotycząca obecności efektu zwiększenia komponentu P3 i skrócenia czasów reakcji dla przewidywalności czasowo-przestrzennej w porównaniu do braku przewidywalności. Zwiększenie komponentu P3 zgodne jest również z doniesieniami płynącymi z badań nad podejmowaniem decyzji w sytuacji ryzyka, czyli warunkowego występowania zdarzeń. Z tego typu sytuacją mieli do czynienia także badani w niniejszym eksperymencie. W jednym z badań (Seer i in., 2016) zaobserwowano, że komponent P3 cechuje się wyższą amplitudą w sytuacji, w której prawdopodobieństwo a priori jest możliwe do obliczenia w porównaniu do sytuacji pozbawionej tej możliwości. W niniejszym badaniu porównywano bloki, w których prawdopodobieństwo występowania bodźca w określonej lokalizacji i czasie mogło zostać obliczone – i zestawiano z blokami, w których nie było takiej możliwości. Uzyskany efekt – amplituda komponentu P3 wyższa w warunku czasowo-przestrzennym w porównaniu do warunku braku przewidywalności – jest zgodny z obserwacją Seer i in. (2016). Interpretacja komponentu P3 jako dotyczącego integracji informacji płynących z różnych modalności i wymiarów pozwala z kolei wyjaśnić brak separowanych efektów dla warunków: czasowego i przestrzennego, a obecność warunku czasowo-przestrzennego (Friedman i in., 2001).

W przypadku pozostałych komponentów (N1 i P2) pojawiających się w literaturze przedmiotu analizy nie wykazały zmian amplitudy dla żadnego z rodzajów przewidywalności (czasowej, przestrzennej, czasowo-przestrzennej). Podobnie jak u Rimmele i in. (2011) komponent P1 nie wystąpił dla niektórych warunków eksperymentalnych (wartości amplitudy nie różniły się istotnie od 0). Dla komponentu N2 nie stwierdzono różnic między warunkami, przy czym zgodnie z literaturą obserwowany on jest częściej wtedy, gdy scena akustyczna jest bardziej angażująca (Lewald i in., 2016).

## 6.2. Eksperyment II

W badaniu dotyczącym prostej sceny akustycznej i zasady kolejności potwierdziły się wyłącznie hipotezy: H5 i H8, które odwołują się do zróżnicowania warunków eksperymentalnych ze względu na wielkość amplitudy wczesnego, percepcyjnego komponentu N1. N1 było wyższe w przypadku przestrzennego oraz czasowo-przestrzennego warunku eksperymentalnego w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Natura eksperymentu nawiązuje do zasady kolejności, która w przypadku wymiaru przestrzennego może tworzyć iluzję ruchu dźwięku pomiędzy poszczególnymi próbami. Kolejne próby tworzą powtarzającą się sekwencję (4-elementową). W badaniu Rimmele i in. (2011), w którym nie zaobserwowano efektu przewidywalności przestrzennej, sekwencje cechowały się istotnie wyższą ilością elementów wchodzących w skład sekwencji ( $N = 14$ ). Długość sekwencji ma istotny wpływ na możliwość niejawnego wyuczenia się zasady (Armstrong i in., 2017; Conway i Christiansen, 2005, 2006; Daltrozzo i Conway, 2014).

Efekt zróżnicowania między warunkami eksperymentalnymi ze względu na amplitudę komponentu N1 w niniejszym eksperymencie nie został zaobserwowany dla porównania między warunkiem czasowym a warunkiem braku przewidywalności. Brak efektu może wiązać się z trudnością w zaobserwowaniu tego typu relacji. Być może zbyt długie interwały pomiędzy kolejnymi próbami spowodowały, że osoby badane nie postrzegały następujących po sobie dźwięków jako spójnej i powiązanej ze sobą całości. Byłoby to zgodne z obserwacją Emberson i in. (2011), którzy zwracają uwagę, że wraz z wydłużającym się odstępem czasowym pomiędzy dźwiękami istnieje ryzyko, że osoby badane będą postrzegać je jako niezależne od siebie wydarzenia. Dla przykładu, badania Mates i in. (1994) wykazały, że osoby badane nie traktują jako powiązanych dźwięków, między którymi występuje interwał dłuższy niż 1,8 do 2 sekund.

Na poziomie komponentu N1 obok efektu przewidywalności przestrzennej zaobserwowano także wyższą amplitudę dla czasowo-przestrzennego warunku eksperymentalnego w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Tego typu efekt obserwowany był najczęściej w przypadku późniejszego etapu przetwarzania (P3; Rimmele i in., 2011). Możliwe wyjaśnienie rozbieżnych wyników pochodzi z innej linii badań, w świetle których przewidywalność wykrywana jest przez system słuchowy wcześniej (Althen i in., 2013; Cornella i in., 2012; Escera i in., 2014; Grimm i Escera, 2012). Dla przykładu, informacja o przewidywalności w zakresie powtórzeń bodźca jest dostępna

dla układu słuchowego już w 20 ms po prezentacji bodźca, natomiast informacja w zakresie bardziej złożonych wzorców jest dostępna dopiero w późniejszym etapie przetwarzania słuchowego, w okolicach 150 ms po prezentacji bodźca (Bendixen, 2014). Innymi słowy, choć informacja o następnym (przewidywalnym) dźwięku jest teoretycznie dostępna jeszcze przed wystąpieniem bodźca, gdy przewidywalność zostanie wyodrębniona, to system słuchowy w rzeczywistości nie „przekazuje” tej informacji ze struktur korowych do wcześniejszych etapów przetwarzania. Jeśli tak jest, to nie dziwi fakt, że złożone formy przewidywalności (jak u Rimmele i in., 2011) nie mogą działać na analizę sceny akustycznej we wczesnych punktach czasowych. W połączeniu z faktem, że tworzenie strumienia na podstawie silnych wskazówek akustycznych zachodzi w czasie krótszym niż 100 ms (Müller i in., 2005) i prawdopodobnie rozpoczyna się w peryferyjnych strukturach drogi słuchowej (Pressnitzer i in., 2008), złożone formy przewidywalności musiałyby wywierać swój wpływ dopiero po uwzględnieniu wskazówek akustycznych. W tym względzie warto zauważyć, że badania, w których wykazano, że przewidywalność działa na analizę sceny akustycznej po uwzględnieniu cech pierwotnych (Bendixen i in., 2010, 2013), stosowały złożone wzorcowe typy przewidywalności. Z kolei badania, których wyniki sugerują, że przewidywalność działa przynajmniej równoległe z cechami pierwotnymi (Andreou i in., 2011; Bendixen i in., 2012b), stosowały proste formy przewidywalności oparte na powtarzaniu lub stopniowym progresie wartości cech. Jest więc możliwe, że proste rodzaje przewidywalności odpowiadają za wczesne efekty w analizie sceny akustycznej, podczas gdy złożone formy przewidywalności rzeczywiście ograniczają się do działania na późniejszym etapie. Interpretacja, że niektóre formy przewidywalności wpływają na przetwarzanie słuchowe wcześniej niż inne jest zgodna z poglądem, że tworzenie strumienia może być uruchamiane na różnych poziomach hierarchii przetwarzania słuchowego w zależności od rodzajów dostępnych wskazówek (Cusack i in., 2004; Griffiths i Warren, 2004; Pressnitzer i in., 2008). Jednak bezpośrednie porównanie wpływu przewidywalności na różne poziomy złożoności pozostaje do przeprowadzenia w przyszłych badaniach.

Nie udało się zaobserwować zróżnicowania pomiędzy warunkami eksperymentalnymi ze względu na amplitudę komponentu P3. Należy zauważyć, że komponent ten zależy od prawdopodobieństwa a priori możliwych wydarzeń (Seer i in., 2016). Zasada kolejności różni się w sposób wyraźny od zasady częstości. O ile wprowadzono organizację pozwalającą przewidywać następujące po sobie bodźce



zarówno w wymiarze czasowym, przestrzennym, jak i przestrzenno-czasowym, to każda lokalizacja i każdy interwał pozostawał równie prawdopodobny. Innymi słowy, na cały blok prób składała się równa liczba lokalizacji (A, B, C i D) oraz interwałów (500, 750, 1000 i 1250 ms). Z kolei w bloku nieprzewidywalnym, mimo braku organizacji kolejnych sekwencji, sytuacja probabilistyczna była podobna w sensie globalnym, tj. każda lokalizacja i każdy interwał cechował się tą samą szansą wystąpienia (tj.  $p = 0,25$ ). Brak efektu na poziomie komponentu P3 wiąże się zatem najprawdopodobniej z obrazem równego prawdopodobieństwa apriorycznego zdarzeń zachodzących w bloku (w przeciwieństwie do zasady częstości), a więc braku możliwości aktualizacji przekonań (ang. *belief updating*) dotyczących tego rozkładu w sensie probabilistycznym (Kopp i in., 2016; Seer i in., 2016).

Nie udało się potwierdzić także zróżnicowania pomiędzy poszczególnymi warunkami eksperymentalnymi ze względu na wielkość amplitudy komponentów P1 i N2. Wzrost amplitudy komponentu P1 i spadek N2 kojarzony może być z obecnością rytmiczności bodźca w porównaniu do braku rytmiczności (Addleman i Jiang, 2019a; Bouwer i Honing, 2015; Rimmele i in., 2011). Brak efektu na poziomie obu komponentów może być związany ze strukturą zadania – w szczególności układu prób dla przewidywalnych bloków. O ile w badaniach nad wskazówką rytmiczną standardem jest prezentacja następujących po sobie dźwięków tworzących jedną próbę (ostatni z dźwięków wymaga odpowiedzi), to w manipulacji podczas niniejszego eksperymentu każda prezentacja dźwięku (poza sygnałem rozpoczynającym nową próbę) wymagała odpowiedzi – stanowiła zatem oddzielną próbę. Mogło to stworzyć wrażenie niezależności prób względem siebie, co w rezultacie mogło znieść efekt. Obserwacja ta byłaby zgodna z analizą Bendixen (2014) – w świetle której brak efektu spowodowany może być brakiem grupowania poziomego, które dotyczy relacji różnych sygnałów słuchowych następujących po sobie w czasie.

### **6.3. Eksperyment III**

Obecność złożonej sceny akustycznej wraz z towarzyszącą jej zasadą częstości pozwoliła na potwierdzenie hipotez: H1, H2, H3, H5 i H9. W przypadku wyniku behawioralnego efekt różnic między warunkami eksperymentalnymi możliwy był do zaobserwowania wyłącznie dla warunku czasowego, który charakteryzował się skróceniem czasów reakcji w porównaniu do warunku braku przewidywalności (H1).

W przeciwieństwie do zasady kolejności, w świetle której każdy interwał (choć tworzy przewidywalną sekwencję) jest równie prawdopodobny, częstość interwału pozwalała na antycypację dźwięku w określonym punkcie w czasie, a tym samym na wykonanie zadania szybciej. Wynikowi behawioralnemu towarzyszył efekt zróżnicowania między warunkami eksperymentalnymi ze względu na amplitudę komponentów zarówno wczesnego (komponent N1; H2 i H5), jak i późnego poziomu (komponent P3; H3 i H9) przetwarzania.

W przypadku warunków eksperymentalnych: czasowego oraz przestrzennego zaobserwowano wyższy poziom amplitudy komponentu N1 w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Z kolei warunki czasowy oraz czasowo-przestrzenny cechowały się wyższą amplitudą komponentu P3 w porównaniu do braku przewidywalności.

Zaobserwowane wzmocnienie amplitudy komponentu N1 może odzwierciedlać sytuację, w świetle której przewidywalna, lecz nie całkowicie pewna wskazówka statystyczna (związana z zasadą częstości lub kolejności), która nie jest informatywna dla samego zadania dyskryminacji dźwięku ze względu na wysokość, powoduje wzrost precyzji uwagi. W przeciwieństwie do prostej sceny akustycznej i zasady częstości, scena złożona zaangażowała również wykorzystanie informacji natury przestrzennej. Rozbieżności w zakresie efektów przewidywalności w odniesieniu do amplitudy N1 są wypadkową braku kontroli wielu czynników – natury probabilistycznej oczekiwań, a także roli, którą pełni wskazówka w całym badaniu (Schröger i in., 2015). W niniejszym eksperymencie zarówno przewidywalny czas, jak i przestrzeń, spowodowały wzrost amplitudy komponentu N1 w porównaniu do bloku, w którym tego typu przewidywania nie mogły zostać wypracowane. Oznaczać to może, że kumulatywnie zbierane doświadczenie, rozumiane także jako historia wyboru (Addleman i Jiang, 2019a) spowodowało, że osoby badane mogły ukierunkować swoją uwagę na prawdopodobne źródło, a także na czas pojawienia się dźwięku, co miało w konsekwencji pozwolić na szybsze wykonanie zadania. Badacze zauważają, że obecność dystraktorów, a więc większa złożoność sceny akustycznej, powoduje jednocześnie większą trudność wykonania zadania (Kidd i in., 2003). Jest to związane z większym obciążeniem przetwarzania – co z kolei niejako wymusza na osobach badanych korzystanie z wszelkich informacji, które są im dostępne – np. apriorycznej informacji związanej z prawdopodobną lokalizacją dźwięku (Hawley i in., 2004; Yost i in., 1996)

Kolejna obserwacja dotyczyła wyższej amplitudy komponentu P3 zarówno dla warunku czasowego, jak i czasowo-przestrzennego w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Po pierwsze, powyższy efekt może być manifestacją udanej integracji informacji płynących z różnych modalności sensorycznych i wymiarów przewidywalności (Picton, 1992). Po drugie, czas wystąpienia efektu dla warunku czasowo-przestrzennego może być powiązany z trudnością zadania związaną z obecnością bodźców dystrykcyjnych (Bendixen, 2014). Wzrost amplitudy P3 odzwierciedla przypuszczalnie także zwiększenie się świadomości organizacji statystycznej obecnej w zadaniu. Część badaczy uważa również, że P3 może być wskaźnikiem wyuczenia się (lub zwiększenia świadomości obecności) reguły. Johnson (1986) zaproponował triarchiczny model amplitudy P3 (ang. *A Triarchic Model of P300 Amplitude*), gdzie czynnikami wpływającymi na P3 są: (1) prawdopodobieństwo bodźca, (2) znaczenie bodźca (związane ze: złożonością zadania, złożonością bodźca i wartością bodźca) oraz (3) ilość przekazywanych informacji (związana z równoważnością i uwagą). O ile w klasycznym paradygmacie oddball, w którym porównywane są bodźce częste i rzadkie, obserwowanym efektem jest wyższa amplituda w przypadku bodźców rzadkich, to zupełnie inną organizację statystyczną reprezentuje przedstawiony w niniejszej rozprawie układ badawczy. Warunki eksperymentalne związane z przewidywalnością: czasową, przestrzenną i czasowo-przestrzenną porównywane są z warunkiem braku przewidywalności, który oznacza sytuację stałej niepewności co do czasu i miejsca pojawiania się bodźców. W przypadku bloków „przewidywalnych” możliwa jest zatem aktualizacja przekonań w ramach kolejnych prób, natomiast w warunku braku przewidywalności aktualizacja dotycząca interwałów i lokalizacji, w których pojawiają się bodźce, może stać się w pewnym momencie zaniechana. Jest to jednocześnie moment, w którym nieprzewidywalność staje się czymś standardowym, co przestaje „zaskakiwać” (ang. *surprise*; Filipowicz i in., 2018; Jabar i in., 2017).

O ile zaobserwowano efekt zróżnicowania między warunkami eksperymentalnymi ze względu na amplitudę komponentów N1 i P3, to nie zarejestrowano go dla komponentów P1 i N2. Amplituda komponentu P1 okazała się nie różnić istotnie od poziomu wartości podstawowej (ang. *baseline*;  $\mu V = 0$ ), co zgodne jest z podobną obserwacją u Rimmelé i in. (2011). Efekt ten przypisywany jest często generalnie niższej amplitudzie komponentu P1 u osób dorosłych. O ile okno czasowe dla komponentu P1 w niniejszym eksperymencie (36-64 ms) jest zbliżone do okna użytego dla P1

przez Rimmele i in. (2011) (29-59 ms), to część badaczy uznałaby je za typowe dla komponentu P50, które cechuje się szczytem amplitudy między 15 a 80 ms (Grunwald i in., 2003). Komponent P50 uznawany jest za wskaźnik bramkowania sensorycznego (ang. *sensory gating*) związany z filtrowaniem przeduwagowym (Sur i Sinha, 2009). Uwzględnienie tych ram odniesienia do zaobserwowanego braku pojawienia się komponentu P1 pozwala wysunąć przypuszczenie, że być może szum użyty w sytuacji złożonej sceny akustycznej nie musiał być ignorowany do skutecznego wykonania zadania dyskryminacji. Mogło to być przyczyną niezaobserwowania komponentu P1.

Brak wpływu przewidywalności na wielkość amplitudy komponentu N2 może wiązać się bezpośrednio ze szczególną jego specyfiką zależną od zadania. Komponentowi N2 przypisuje się często rolę w etapie analizy związanej z detekcją celu (Soltani i Knight, 2000) i przyjmuje, że jest on zależny od uwagi selektywnej (Michie, 1984; Michie i in., 1990). Dotychczas zaobserwowane efekty wiążą się często z regułą przekazywaną osobom badanym w sposób *explicite* (Eimer, 1993). W jednym z badań nad uczeniem się przewidywalności *implicite* podczas wykonywania zadania *go/no-go* wystąpił efekt wpływu przewidywalności czasowej na amplitudę N2, jednak dotyczył on głównie elektrod o czołowej dystrybucji (Rimmele i in., 2011). Ponadto organizacja prezentowanych bodźców miała w tym badaniu charakter sekwencyjnego, pozwalającego na precyzyjny timing bodźca. Wydaje się prawdopodobne, że brak efektu w niniejszym eksperymencie mógł być wynikiem interakcji specyfiki zadania dyskryminacji, a także użytej zasady statystycznej. Zasada częstości, w przeciwieństwie do zasady kolejności, nie prezentuje bowiem znamion rytmiczności, z którą kojarzony jest komponent N2 (Corbetta i Shulman, 2002).

#### **6.4. Eksperyment IV**

Efekty zaobserwowane w eksperymencie dotyczącym złożonej sceny akustycznej i zasady kolejności dotyczą zróżnicowania między warunkami eksperymentalnymi ze względu na amplitudę komponentu N1 i N2. Warunek przestrzenny (H5) i przestrzenno-czasowy (H8) cechowały się istotnie wyższą amplitudą komponentu N1 w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Ponadto warunek przestrzenny cechował się wyższą amplitudą komponentu N2 w porównaniu do warunku braku przewidywalności.

Wyuczenie się zasady kolejności dotyczącej powtarzających się sekwencji lokalizacji między kolejnymi próbami (warunek przestrzenny) spowodowało wzrost

amplitudy komponentu N1 w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Efekt zaobserwowany został także dla warunku czasowo-przestrzennego. Wzrost komponentu N1 może być interpretowany zgodnie z Teorią Kodowania Predykcyjnego jako zaangażowanie uwagi, które precyzowane jest przez przewidywalność (Schröger i in., 2015). Wiąże się to jednocześnie ze zwiększeniem zasobów uwagi skupionej na oczekiwaniu na bodźce pojawiające się w przewidywalnym miejscu (Posner, 1980). Brak efektu warunku czasowego w eksperymentach z zasadą kolejności może wiązać się z trudniejszą do wyuczenia charakterystyką zasady niż w przypadku zasady częstości (Rimmele i in., 2011), a także wspomnianymi już wcześniej, relatywnie długimi interwałami oddzielającymi kolejne próby w eksperymencie (Mates i in. 1994). Rozdzielczość temporalna percepcji słuchowej człowieka maleje wraz z wydłużaniem interwału między kolejnymi dźwiękami (Grondin, 2010; Lewis i Miall, 2009; Piras i Coull, 2011; Wearden, 2016). Skutkuje to zmniejszeniem efektywności korzystania z tej wskazówki jako użytecznej dla wykonania zadania (Los i Schut, 2008; Seibold i Rolke, 2014a, 2014b; Steinborn i in., 2017).

Istotną obserwacją jest wystąpienie efektu wzrostu amplitudy komponentu N2 w warunku przestrzennym w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Obserwacja ta zgodna jest z literaturą, w świetle której złożona scena akustyczna (w porównaniu do prostej) w kontekście informacji przestrzennej może wywoływać komponent N2 (Lewald i Getzmann, 2015; Lewald i in., 2016; Tomé i in., 2015), który wiązany jest z orientacją uwagi słuchowej w sytuacji występowania dystraktorów. Wielkość amplitudy tego komponentu może być zatem skorelowana z przydatnością informacji w kontekście wykonywanego zadania.

Analiza zróżnicowania warunków eksperymentalnych pod względem wielkości amplitudy komponentu P1 nie wykazała istotnego efektu. Zgodnie z propozycją Gonçalves i in. (2018) amplituda P1 może być skorelowana z intensywnością wskazówki obecnej w zadaniu. W świetle tej interpretacji brak efektu można uznać za związany z naturą implementacji zasady kolejności w eksperymencie. Wymagała ona wyuczenia się sekwencyjnego wzorca w sposób utajony, opierający na skumulowanym doświadczeniu. Jednocześnie nie zaobserwowano efektu warunku eksperymentalnego na poziomie komponentu P3, który zgodnie z obserwacją Lange (2012) współwystępuje z przygotowaniem motorycznym objawiającym się skróceniem czasów reakcji. W przypadku niniejszego badania nie zaobserwowano jednak efektu warunku

eksperymentalnego na poziomie behawioralnym. Być może brak efektu wiąże się z obserwacją Bendixen (2014), zgodnie z którą szybkość integracji informacji zależna jest od złożoności sekwencji obecnych w zadaniu. Byłoby to spójne z zarejestrowaniem obecności efektu warunku wymiaru czasowo-przestrzennego w postaci wzrostu amplitudy komponentu N1 w porównaniu do warunku braku przewidywalności.

## **6.5. Wnioski ogólne**

W czterech przeprowadzonych eksperymentach weryfikujących wpływ przewidywalności pojawiania się dźwięku w wymiarze czasowym, przestrzennym i przestrzenno-czasowym na orientację uwagi słuchowej udało się zaobserwować szereg wspólnych właściwości. Na poziomie behawioralnym efekt został zaobserwowany wyłącznie w warunkach, w których obecna była zasada częstości – przy czym dla prostej sceny akustycznej efekt dotyczył warunku czasowo-przestrzennego, natomiast dla złożonej sceny akustycznej – warunku czasowego. Efekt dotyczył skrócenia czasów reakcji w przypadku powyższych warunków w porównaniu do warunku braku przewidywalności. Eksperymenty zbudowane w oparciu o zasadę częstości i oba typy scen akustycznych w paradygmacie uczenia utajonego (eksperyment I i III) są jednocześnie do tej pory jedynymi, w których udało się zaobserwować efekt zróżnicowania pomiędzy warunkami eksperymentalnymi na poziomie późniejszego komponentu związanego z zadaniem, tj. P3. Zasada częstości generowała wyższą amplitudę komponentu P3 dla wymiaru czasowo-przestrzennego w porównaniu do braku przewidywalności – bez względu na rodzaj sceny akustycznej. Co ciekawe, w przypadku zasady kolejności warunków czasowo-przestrzenny cechował się wyższą amplitudą komponentu N1 w porównaniu do braku przewidywalności – także bez względu na rodzaj sceny akustycznej. Zróżnicowanie to wpisuje się w obserwację Töllnera i in (2012) podkreślających znaczenie specyfiki zadania dla sposobu przetwarzania informacji. Schröger i in. (2015) proponują, że zróżnicowanie wyników badań nad przewidywalnością i uwagą może być też uwarunkowane organizacją statystyczną. W przypadku prezentowanych w rozprawie badań zasada częstości i kolejności pozwoliły zaobserwować zróżnicowany wpływ warunków eksperymentalnych na wielkość amplitudy komponentu N1 związanego z procesami percepcyjnymi (Picton, 1992). Wpływ ten uwarunkowany był ponadto typem sceny akustycznej. Dla prostej sceny akustycznej w przypadku obu zasad zaobserwowano wzrost amplitudy komponentu N1 w warunkach „przewidywalnych” w porównaniu do warunku braku

przewidywalności, jednak w przypadku zasady kolejności był to efekt dotyczący warunku przestrzennego, natomiast dla zasady częstości – efekt warunku czasowego. Wskazuje to na odmienną rolę obu typów uczenia się statystycznego, która wnosi istotną wiedzę o trzecim czynniku mogącym orientować uwagę słuchową – doświadczeniu, w szczególności historii wyboru (Addleman i Jiang, 2019a). Ponadto fakt, że wzrost amplitudy N1 dla określonych wymiarów przewidywalności uzależniony jest od typu organizacji statystycznej, wnosi dodatkową wiedzę do dyskusji dotyczącej odmiennych wpływów przewidywalności i uwagi na ten komponent (Lange, 2013; Schröger i in., 2015). W przypadku złożonej sceny akustycznej efekt obu zasad organizacji statystycznej także został zaobserwowany, przy czym warunek przestrzenny generował wzrost amplitudy komponentu N1 w porównaniu do warunku braku przewidywalności niezależnie od użytej zasady. Warunek czasowy z kolei, podobnie jak w przypadku prostej sceny akustycznej, dotyczył wyłącznie zasady częstości. Wydaje się prawdopodobne, że uwzględnienie bliższej warunkom naturalnym złożonej sceny akustycznej poskutkowało koniecznością korzystania z informacji przestrzennej celem efektywnego wykonania zadania (Lewald i Getzmann, 2015). Trafność tego przypuszczenia wzmacnia wzrost amplitudy komponentu N2 obserwowany dla warunku przestrzennego w porównaniu do warunku braku przewidywalności w sytuacji złożonej sceny akustycznej i zasady kolejności. Komponent ten wiązany jest z orientacją uwagi słuchowej w sytuacji obecności wskazówek przestrzennych (Lewald i in., 2016). Kontrolowanie odseparowanych zasad częstości i kolejności oraz typów scen akustycznych – prostej i złożonej – pozwoliło na wykazanie odmiennego wpływu przewidywalności czasowej, przestrzennej oraz czasowo-przestrzennej na orientację uwagi słuchowej.

Prezentowane w niniejszej rozprawie wyniki zdają się wpisywać w szeroki nurt badań związany z próbą odpowiedzi na pytanie: jakie mechanizmy ukierunkowują uwagę człowieka? Część badaczy uważa, że uwaga jest wynikiem interakcji między różnymi poziomami wnioskowania. Z jednej strony wnioski dotyczą przyczyn sygnałów sensorycznych – z innej jest to całościowy, często świadomy model rzeczywistości. We wnioskowaniu często uwzględnia się wiele różnych źródeł informacji, w tym doświadczenie, ale także motywy i emocje. Niezależnie od tego, w jaki sposób ustalany jest szablon tego, na co zwrócić uwagę, jest on wykorzystywany do zwiększenia wzmocnienia tej reprezentacji. Innymi słowy, wzmocnienie może być zaobserwowane,

ponieważ na pewnym poziomie hierarchii neuronalnej istnieje szablon uwagi, który koduje to, na co uwaga ma być zwrócona. Skutkuje to większą precyzją odpowiednich reprezentacji (przewidywań), co prowadzi w konsekwencji do wzmocnienia ich błędów predykcji.

Kiedy zadanie wymaga dyskryminacji bodźców ze względu na określone cechy, przewidywania dostrajane są do tych właśnie cech. Jeśli z kolei dostarczona zostaje informacja o przewidywalności czasowej lub przestrzennej, to prawdopodobne czasy i miejsca pojawienia się cech istotnych dla zadania także zostają wzmocniane – nawet jeśli nie niosą informacji na temat tych cech. Wyjaśnia to wzmocnione odpowiedzi neuronalne, na które zwracana jest uwaga, a efekt ten zbliżony jest do teorii wzmocnienia efektów uwagi (Hillyard i in., 1973; Lange, 2013; Rimmele i in., 2011). Wzmocnienie może być zatem regulowane stopniem przewidywalności danych wejściowych – to on napędza uwagę. Istnieją dwa aspekty tego zagadnienia. Pierwszy odnosi się do różnicy między kontekstami przewidywalnymi i nieprzewidywalnymi. W bardziej przewidywalnych kontekstach system będzie w stanie stworzyć dokładniejszy model sytuacji, a tym samym precyzja błędów predykcji będzie wyższa. Z zasady, bardziej precyzyjne błędy predykcji otrzymują większy zysk rozumiany jako przyrost informacji związany z aktualizacją przekonań o rzeczywistości (Hohwy, 2013). Drugi aspekt odnosi się do faktu, że wzmocnienie może być regulowane w zależności od wielkości błędu predykcji, jaki otrzymuje system. Ponieważ celem systemu jest zminimalizowanie błędu predykcji (Friston, 2010), duże sygnały błędu predykcji wymuszają rekonfigurację modelu wewnętrznego i być może wymagają zaangażowania mechanizmów uwagi wolicjonalnej. Uzyskane w rozprawie doktorskiej wyniki wspierają powyższe obserwacje.

## **6.6. Ograniczenie badań własnych**

Prezentowane w niniejszej rozprawie badania posiadają szereg ograniczeń, które należy podkreślić przy planowaniu przyszłych eksperymentów. Töllner i in (2012) zwracają uwagę, że przetwarzanie informacji zależne jest w dużej mierze od charakterystyki zadania, z którym mają do czynienia osoby badane. W niniejszym projekcie za cel wzięto weryfikację hipotez na przykładzie zadania dyskryminacji, które uznawane jest za bardziej angażujące w porównaniu do np. zadania detekcji czy go/no go. Nie można zatem wykluczyć, że potencjalne różnice w zakresie efektów uzyskanych w niniejszym projekcie w porównaniu np. do badania Rimmele i in. (2011), którzy



korzystali z zadania go/no go wynikały ze specyfiki zadania czy też ogólnego projektu eksperymentu i kontrolowania zasad uczenia statystycznego. Kopp i in. (2016) zwracają uwagę na stopniowalność poziomu pewności-niepewności zdarzeń w strukturze bodźców podczas eksperymentu. W niniejszym badaniu organizacja probabilistyczna sprowadzona była do często obecnych układów w literaturze (np. 70%-30%). Możliwe jest jednak, że część efektów mogła nie zostać zaobserwowana ze względu na niewystarczającą pewność występowania określonych interwałów lub lokalizacji. Zasady częstości i kolejności nie wyczerpują możliwych układów badawczych pozwalających weryfikować rolę przewidywalności w kontekście wpływu na orientację uwagi słuchowej. Bendixen (2014), a także Heilbron i Chait (2019) proponują szereg dodatkowych zmiennych, które warto uwzględnić, mogących wpływać na przetwarzanie uwagi. Jedną z nich – wymiar globalny vs. lokalny zasad przewidywalności został uwzględniony w niniejszym projekcie.

Wśród ograniczeń należy z pewnością uwzględnić niski poziom kontroli świadomości zasad. Jedynym sposobem było werbalne pytanie o to, czy osoby zdawały sobie sprawę z organizacji statystycznej dźwięków. Kolejnym aspektem, który może budzić zastrzeżenia jest arbitralna dychotomia między prostą a złożoną sceną akustyczną (Pichora-Fuller, 2008). W szczególności złożona scena akustyczna mogłaby składać się z dźwięków naturalnych o większej trafności, jednak ze względu na potrzebę kontroli wariancji zdecydowano się na dźwięki wygenerowane za pomocą syntetyzatora. Wymiar przestrzenny uwzględniał wyłącznie płaszczyznę horyzontalną, pominięto wymiar wertykalny, co podyktowane zostało ekonomią czasu trwania eksperymentu. Zgodnie z zaleceniami czas badania utrzymano na poziomie 50 minut, aby uniknąć zmęczenia osób badanych w wyniku powtarzalności sytuacji eksperymentalnej, które może skutkować problemami z utrzymaniem wzroku na punkcie fiksacji (Chica i in., 2014). Wśród potencjalnych przyczyn braku efektu dla przewidywalności czasowej w eksperymentach z zasadą kolejności nie można wykluczyć zbyt długich odstępów pomiędzy kolejnymi próbami, co mogło skutkować traktowaniem ich jako niezależnych od siebie przez osoby badane (Emberson i in., 2011). Przerwy były podyktowane jednak koniecznością poprawnego zarejestrowania potencjałów wywołanych tak, by uniknąć ryzyka kontaminacji (nachodzenia ich na siebie w czasie). Być może przy użyciu innego paradygmatu lub techniki badawczej udałoby się skrócić czas pomiędzy kolejnymi próbami.

## 6.7. Wolor praktyczny badań

Selekcja uwagi słuchowej ma zastosowanie w codziennych sytuacjach komunikacyjnych. Trudności w wyodrębnianiu ważnych informacji z szumu tła wiążą się często z zaburzeniami komunikacji u osób w różnym wieku. Zarówno u dzieci, jak i dorosłych trudności te mogą przyczyniać się do większej izolacji społecznej, a także gorszej jakości życia (Dalton i in., 2003; Weinstein i Ventry, 1982). Zdolności mające wpływ na wydajność percepcyjną, jak kontrola hamowania, pamięć robocza czy szybkość przetwarzania (Dryden i in., 2017; Hadar i in., 2016) ulegają także zmianie z powodu wieku i wiążącym się z nim ubytkiem słuchu (Getzmann i in., 2014; Price i in., 2019; Shinn-Cunningham i Best, 2008). Ostatnie badania wykazują, że odgórna modulacja uwagi we wczesnym przetwarzaniu sensorycznym może wzmocnić neuronalne reprezentacje sygnałów słuchowych na całej drodze słuchowej (Jääskeläinen i Ahveninen, 2014) oraz wspomóc reakcje behawioralne. O ile prezentowane w niniejszej rozprawie badania mają charakter podstawowy, to dostarczają obserwacji, że środowiskowa obecność zasady częstości pozwala na szybszą dyskryminację bodźców, a zasada kolejności wzmacnia efekt percepcyjny dla wymiaru przestrzennego. Warto byłoby zatem sprawdzić, czy przy projektowaniu programów rehabilitacyjnych, a także infrastruktury przestrzennej, obserwacje te pozwalają częściowo ułatwić lub zrekompensować osłabienie we wspomnianych wcześniej zdolnościach poznawczych.

Uwaga odgrywa rolę nie tylko w psychologii poznawczej, ale także w neuroauce. Pełni również ważną funkcję w informatyce, a także naukach inżynierskich. Znajomość mechanizmów uwagi pozwala używać jej przy analizie scen akustycznych, dzięki czemu zasoby obliczeniowe kierowane są do obszarów o największej ilości informacji. Pozwala to skutecznie redukować szum płynący z nieistotnych części sceny (Kaya i Elhilali, 2017). Jednym z takich zadań jest rozpoznawanie mowy i dźwięku: automatyczne rozpoznawanie ulega znacznemu pogorszeniu w hałaśliwym otoczeniu. Wiedza o źródłach ukierunkowujących uwagę, a także rozwój teorii obliczeniowych pozwalają ten proces usprawnić. Historia wyboru proponowana przez Addleman i Jiang (2019a) dla modalności słuchowej sugeruje, że wiedza zdobywana w drodze kumulatywnie zbieranego doświadczenia pozwala człowiekowi przyspieszyć procesy przetwarzania bodźca za sprawą neuronalnego przygotowania.

Wiedza płynąca z coraz bogatszych modeli uwagi ma duże znaczenie dla ulepszania systemów sonifikacji (Evangelopoulos i in., 2013; Tordini i in., 2015). Celem jest tutaj

przekształcanie różnego rodzaju informacji w dźwięk mogący służyć jako pomoc dla osób niewidomych. Wykazano, że integracja technik modelowania procesów oddolnych i odgórnych poprawia lokalizację dźwięku w środowisku złożonej sceny akustycznej (Liu i in., 2011; Sidaty i in., 2016). Wyniki prezentowane w ramach niniejszej rozprawy sugerują, że wydaje się prawdopodobne, iż uwzględnianie w modelach różnych rodzajów doświadczeń, w tym uczenia się na podstawie historii wyboru także pozwoli na wzrost efektywności organizacji przestrzennej. Co więcej, mechanizmy ukierunkowujące uwagę mogą służyć efektywnej kompresji danych natury dźwiękowej (Podwinska, 2020), a także pozwalają wykrywać nietypowe dźwięki, co efektywnie wykorzystywane jest w medycynie do diagnostyki w zakresie wykrywania nieprawidłowości u pacjentów (Kaya i Elhilali, 2013). Wreszcie, modele uwagi słuchowej są ważnym składnikiem modeli audiowizualnych i ich zastosowań. Doprowadziło to do powstania modeli, w których zarówno wzrok, jak i słuch są jednakowo istotne w określaniu orientacji uwagi (Ramenahalli i in., 2013). Modele te cechują się wyższymi wynikami w zakresie przewidywania spojrzeń oczu w filmach niż propozycje oparte wyłącznie na wzroku.

## **6.8. Przyszłe kierunki badań**

W przyszłych badaniach uwzględniających rolę przewidywalności przestrzennej w orientacji uwagi słuchowej warto uwzględnić warunki zadania związane z lokalizacją bodźca. Kwestią interesującą jest, czy mechanizm facylitacyjny możliwy jest do zaobserwowania także na poziomie komponentów kontrlateralnych. Można do nich zaliczyć N2ac (ang. *anterior contralateral subcomponent of the N2*), a także LPCpc (ang. *posteriori-contralateral late positive subcomponent*) (Lewald i in., 2016). Obserwacja modulacji uwagowej na poziomie komponentów kontrlateralnych mogłaby wnieść nową wiedzę do obszaru związanego z asymetrią funkcjonalną mózgu podczas przetwarzania informacji słuchowej (Schönwiesner i in., 2007). Bendixen (2014) wprowadza w swoim przeglądzie termin organizacji zintegrowanej i segregowanej (ang. *integrated and segregated*). Organizacja statystyczna w niniejszym badaniu dotyczyła globalnej zasady, która funkcjonowała niezależnie od rodzaju bodźca w zadaniu dyskryminacji. Różne efekty podkreślane są jednak w zależności od obecności zasad na poziomie lokalnym (tj. zasada dla jednego z dźwięków lub zasady dla obu dźwięków). Kwestia ta wydaje się atrakcyjna, ponieważ wciąż niejednoznaczne efekty pojawiają się w zależności od poziomu wprowadzonych w eksperymencie zasad (globalny vs. lokalny).

Różne są wreszcie sposoby rozumienia przewidywalności w wymiarze czasowym i przestrzennym. O ile w przypadku przewidywalności czasowej często stosowanym paradygmatem jest paradygmat poprzedzania (ang. *foreperiod paradigm*), który polega na manipulacji długością interwałów poprzedzających wystąpienie celu (Thomaschke i in., 2016), to lokalizacja bodźca wpisana jest równolegle w jego wystąpienie. Być może zmiana rozumienia przewidywalności przestrzennej z „gdzie” na „odległość lokalizacji pomiędzy kolejnymi dźwiękami w następujących po sobie próbach” pozwoliłaby na nadanie parametrom czasu i przestrzeni równych wag.

## 6.9. Konkluzja

Zebrane do tej pory wyniki eksperymentalne dotyczące wpływu przewidywalności na orientację uwagi słuchowej ujawniają nieco rozbieżny wzorzec wyników. Oprócz oczywistych różnic w metodologii stosowanej do badania odpowiedzi neuronalnych oraz badanej modalności (bodźce słuchowe, wzrokowe lub multimodalne), należy zauważyć, że wiele badań stosuje różne definicje operacyjne uwagi i przewidywalności. Jedną z rozbieżności odnosi się do sposobu manipulacji predykcją. W niektórych badaniach (Jones i in., 2013; Kok i in., 2012; Jiang i in., 2013) efekty predykcji odzwierciedlają porównanie między przewidywanymi (bardziej prawdopodobnymi) i nieprzewidywanymi (mało prawdopodobnymi) danymi wejściowymi, podczas gdy w innych (Hsu i in., 2014; Rimmele i in., 2011) w pełni przewidywalny warunek jest przeciwstawiany nieprzewidywalnemu, losowemu warunkowi. Co ciekawe, w tym drugim przypadku wykazano, że efekt uwagi jest w pełni zależny od przewidywalności. Jest to zgodne z koncepcją, że mechanizm modulujący wzmocnienie błędu przewidywania (tj. uwaga) działa poprzez wnioskowanie o oczekiwanej precyzji i zwiększa wzmocnienie dla przewidywanych danych wejściowych. Tego typu efekt zaobserwowany został również w prezentowanym badaniu.

Kolejną kwestią jest opieranie badań nad uwagą na dychotomii mechanizmów ukierunkowujących ją: oddolnych i odgórnych. Propozycja Addlemana i Jiang (2019a) dotycząca wprowadzenia czynnika doświadczenia jako wyjaśniającego nieoczywiste efekty uwagi została w niniejszej rozprawie poszerzona o dwie składowe historii wyboru – zasadę częstości i kolejności. Sugestie Töllnera i in. (2012) dotyczące kontroli specyfiki zadania, a także warunków eksperymentalnych skłoniły mnie do wprowadzenia dwóch scen akustycznych: prostej i złożonej. Zarówno zasady organizacji statystycznej, jak i typ

sceny akustycznej okazały się w odmienny sposób angażować udział w wykorzystaniu wskazówek czasowych i przestrzennych. O ile w sytuacji prostej sceny akustycznej w przypadku zasady częstości efekty elektrofizjologiczne dotyczyły głównie domeny czasowej, to zasada kolejności angażowała przede wszystkim wymiar przestrzenny. Z kolei złożona scena akustyczna uznawana za trudniejszą percepcyjnie spowodowała użycie wskazówki przestrzennej niezależnie od zasady organizacji statystycznej, co przejawiało się wzrostem amplitudy wczesnego komponentu N1 w porównaniu do braku przewidywalności. Wreszcie, niezależnie od typu sceny akustycznej zasada częstości wywołała integrację informacji płynących zarówno z wiedzy o czasie, jak i miejscu pojawiania się, co przejawiało się wzrostem amplitudy komponentu P3 dla warunku czasowo-przestrzennego w porównaniu do braku przewidywalności. Co ciekawe, efekt czasowo-przestrzenny dla zasady kolejności (także niezależnie od typu sceny) wystąpił już na wczesnym, percepcyjnym poziomie – charakteryzując się bardziej ujemną amplitudą komponentu N1, gdy predykcje mogły zostać wytworzone.

Podsumowując, celem badania była weryfikacja wpływu przewidywalnej częstości i kolejności wymiaru czasowego, przestrzennego i czasowo-przestrzennego pojawiania się bodźca na orientację uwagi słuchowej w zadaniu dyskryminacji w sytuacji prostej i złożonej sceny akustycznej. Na podstawie przeprowadzonych czterech eksperymentów uwzględniających zasady organizacji statystycznej oraz typ sceny akustycznej udało się przedstawić odmienny charakter wpływu każdego z wymiarów przewidywalności, wykorzystując do tego, obok wskaźnika behawioralnego, także wskaźniki elektrofizjologiczne opierające się na pomiarze mózgowych potencjałów skorelowanych ze zdarzeniem, co pozwoliło uwzględnić czasowy przebieg tego wpływu.

## Bibliografia

- Addleman, D. A., Jiang, Y. V. (2019a). Experience-driven auditory attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 23(11), 927-937. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.08.002>
- Addleman, D. A., Jiang, Y. V. (2019b). The influence of selection history on auditory spatial attention. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 45(4), 474-488. <https://doi.org/10.1037/xhp0000620>
- Ahveninen, J., Jääskeläinen, I. P., Raij, T., Bonmassar, G., Devore, S., Hämäläinen, M., ... , Belliveau, J. W. (2006). Task-modulated “what” and “where” pathways in human auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(39), 14608-14613. <https://doi.org/10.1073/pnas.0510480103>
- Ahveninen, J., Kopčo, N., Jääskeläinen, I. P. (2014). Psychophysics and neuronal bases of sound localization in humans. *Hearing research*, 307(1), 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.07.008>
- Alain, C., Arnott, S. R., Hevenor, S., Graham, S., Grady, C. L. (2001). “What” and “where” in the human auditory system. *Proceedings of the national academy of sciences*, 98(21), 12301-12306. <https://doi.org/10.1073/pnas.211209098>
- Alain, C., Izenberg, A. (2003). Effects of attentional load on auditory scene analysis. *Journal of cognitive neuroscience*, 15(7), 1063-1073. <https://doi.org/10.1162/089892903770007443>
- Alain, C., Woods, D. L. (1997). Attention modulates auditory pattern memory as indexed by event-related brain potentials. *Psychophysiology*, 34(5), 534-546. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1997.tb01740.x>
- Alards-Tomalín, D., Brosowsky, N. P., Mondor, T. A. (2017). Auditory statistical learning: Predictive frequency information affects the deployment of contextually mediated attentional resources on perceptual tasks. *Journal of Cognitive Psychology*, 29(8), 977-987. <https://doi.org/10.1080/20445911.2017.1353518>
- Althen, H., Grimm, S., Escera, C. (2013). Simple and complex acoustic regularities are encoded at different levels of the auditory hierarchy. *European Journal of Neuroscience*, 38(10), 3448-3455. <https://doi.org/10.1111/ejn.12346>

- Anderson, B. A. (2016). Value-driven attentional capture in the auditory domain. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 78(1), 242-250. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-1001-7>
- Anderson, B. D., Moore J. B. (1979). *Optimal Filtering*. Eaglewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Anderson, J. R. (2005). *Cognitive psychology and its implications*. Macmillan.
- Andreou, L. V., Kashino, M., Chait, M. (2011). The role of temporal regularity in auditory segregation. *Hearing research*, 280(1-2), 228-235. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2011.06.001>
- Arbogast, T. L., Kidd Jr, G. (2000). Evidence for spatial tuning in informational masking using the probe-signal method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(4), 1803-1810. <https://doi.org/10.1121/1.1289366>
- Arbogast, T. L., Mason, C. R., Kidd Jr, G. (2002). The effect of spatial separation on informational and energetic masking of speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(5), 2086-2098. <https://doi.org/10.1121/1.1510141>
- Armstrong, B. C., Frost, R., Christiansen, M. H. (2017). The long road of statistical learning research: Past, present and future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1711), 20160047. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0047>
- Arnott, S. R., Binns, M. A., Grady, C. L., Alain, C. (2004). Assessing the auditory dual-pathway model in humans. *Neuroimage*, 22(1), 401-408. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.01.014>
- Asutay, E., Västfjäll, D. (2016). Auditory attentional selection is biased by reward cues. *Scientific reports*, 6(1), 1-6. <https://doi.org/10.1038/srep36989>
- Atiani, S., David, S. V., Elgueda, D., Locastro, M., Radtke-Schuller, S., Shamma, S. A., Fritz, J. B. (2014). Emergent selectivity for task-relevant stimuli in higher-order auditory cortex. *Neuron*, 82(2), 486-499. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2014.02.029>

- Auksztulewicz, R., Friston, K. (2015). Attentional enhancement of auditory mismatch responses: a DCM/MEG study. *Cerebral cortex*, 25(11), 4273-4283. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu323>
- Awh, E., Belopolsky, A. V., Theeuwes, J. (2012). Top-down versus bottom-up attentional control: A failed theoretical dichotomy. *Trends in cognitive sciences*, 16(8), 437-443. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.06.010>
- Baddeley, A., Wilson, B. A. (1994). When implicit learning fails: Amnesia and the problem of error elimination. *Neuropsychologia*, 32(1), 53-68. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(94\)90068-X](https://doi.org/10.1016/0028-3932(94)90068-X)
- Baghdadi, G., Towhidkhah, F., Rajabi, M. (2021). *Neurocognitive Mechanisms of Attention: Computational Models, Physiology, and Disease States*. Academic Press.
- Baldeweg, T. (2006). Repetition effects to sounds: evidence for predictive coding in the auditory system. *Trends in cognitive sciences*, 10(3), 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.01.010>
- Barakat, B. K., Seitz, A. R., Shams, L. (2013). The effect of statistical learning on internal stimulus representations: Predictable items are enhanced even when not predicted. *Cognition*, 129(2), 205-211. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.07.003>
- Barascud, N., Pearce, M. T., Griffiths, T. D., Friston, K. J., Chait, M. (2016). Brain responses in humans reveal ideal observer-like sensitivity to complex acoustic patterns. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(5), 616-625. <https://doi.org/10.1073/pnas.1508523113>
- Bastos, A. M., Usrey, W. M., Adams, R. A., Mangun, G. R., Fries, P., Friston, K. J. (2012). Canonical microcircuits for predictive coding. *Neuron*, 76(4), 695-711. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.10.038>
- Battelli, L., Walsh, V., Pascual-Leone, A., Cavanagh, P. (2008). The ‘when’ parietal pathway explored by lesion studies. *Current opinion in neurobiology*, 18(2), 120-126. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2008.08.004>



- Bausenhart, K. M., Rolke, B., Hackley, S. A., Ulrich, R. (2006). The locus of temporal preparation effects: Evidence from the psychological refractory period paradigm. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13(3), 536-542. <https://doi.org/10.3758/BF03193882>
- Bausenhart, K. M., Rolke, B., Ulrich, R. (2007). Short Article: Knowing When to Hear Aids What to Hear. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 60(12), 1610-1615. <https://doi.org/10.1080/17470210701536419>
- Beck, M. R., Hong, S. L., van Lamsweerde, A. E., Ericson, J. M. (2014). The effects of incidentally learned temporal and spatial predictability on response times and visual fixations during target detection and discrimination. *PLoS One*, 9(4), artykuł e94539. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094539>
- Belin, P., Zatorre, R. (2000). 'What', 'where' and 'how' in auditory cortex. *Nature Neuroscience*, 3(10), 965-966. <https://doi.org/10.1038/79890>
- Bendixen, A. (2014). Predictability effects in auditory scene analysis: a review. *Frontiers in neuroscience*, 8, artykuł 60. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00060>
- Bendixen, A., Böhm, T. M., Szalárdy, O., Mill, R., Denham, S. L., Winkler, I. (2013). Different roles of similarity and predictability in auditory stream segregation. *Learning & Perception*, 5(2), 37-54. <https://doi.org/10.1556/LP.5.2013.Suppl2.4>
- Bendixen, A., Denham, S. L., Gyimesi, K., Winkler, I. (2010). Regular patterns stabilize auditory streams. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(6), 3658-3666. <https://doi.org/10.1121/1.3500695>
- Bendixen, A., SanMiguel, I., Schröger, E. (2012a). Early electrophysiological indicators for predictive processing in audition: a review. *International Journal of Psychophysiology*, 83(2), 120-131. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2011.08.003>
- Bendixen, A., Schröger, E., Ritter, W., Winkler, I. (2012b). Regularity extraction from non-adjacent sounds. *Frontiers in Psychology*, 3, artykuł 143. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00143>

- Bendixen, A., Schröger, E., Winkler, I. (2009). I heard that coming: event-related potential evidence for stimulus-driven prediction in the auditory system. *Journal of Neuroscience*, 29(26), 8447-8451. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1493-09.2009>
- Berger, A., Henik, A., Rafal, R. (2005). Competition between endogenous and exogenous orienting of visual attention. *Journal of experimental psychology: General*, 134(2), 207-221. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.134.2.207>
- Best, V., Marrone, N., Mason, C. R., Kidd, G., Shinn-Cunningham, B. G. (2009). Effects of sensorineural hearing loss on visually guided attention in a multitalker environment. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 10(1), 142-149. <https://doi.org/10.1007/s10162-008-0146-7>
- Best, V., Ozmeral, E. J., Shinn-Cunningham, B. G. (2007). Visually-guided attention enhances target identification in a complex auditory scene. *Journal for the Association for Research in Otolaryngology*, 8(2), 294-304. <https://doi.org/10.1007/s10162-007-0073-z>
- Bey, C., McAdams, S. (2002). Schema-based processing in auditory scene analysis. *Perception & psychophysics*, 64(5), 844-854. <https://doi.org/10.3758/BF03194750>
- Bizley, J. K., Cohen, Y. E. (2013). The what, where and how of auditory-object perception. *Nature Reviews Neuroscience*, 14(10), 693-707. <https://doi.org/10.1038/nrn3565>
- Boh, B., Herholz, S. C., Lappe, C., Pantev, C. (2011). Processing of complex auditory patterns in musicians and nonmusicians. *PLoS One*, 6(7), artykuł e21458. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021458>
- Borji, A., Sihite, D. N., Itti, L. (2013). What stands out in a scene? A study of human explicit saliency judgment. *Vision research*, 91, 62-77. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2013.07.016>
- Bouwer, F. L., Honing, H. (2015). Temporal attending and prediction influence the perception of metrical rhythm: evidence from reaction times and

- ERPs. *Frontiers in psychology*, 6, artykuł 1094).  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01094>
- Bregman, A. S. (1990). *Auditory scene analysis: the perceptual organization of sound*. Cambridge (MA): A Bradford book.
- Bregman, A. S. (1994). *Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound*. MIT press.
- Bregman, A. S., Campbell, J. (1971). Primary auditory stream segregation and perception of order in rapid sequences of tones. *Journal of experimental psychology*, 89(2), 244-249. <https://doi.org/10.1037/h0031163>
- Briggs, F., Mangun, G. R., Usrey, W. M. (2013). Attention enhances synaptic efficacy and the signal-to-noise ratio in neural circuits. *Nature*, 499(7459), 476-480. <https://doi.org/10.1038/nature12276>
- Broadbent, D. E. (1958/2013). *Perception and communication*. Elsevier.
- Bronkhorst, A. W. (2000). The cocktail party phenomenon: A review of research on speech intelligibility in multiple-talker conditions. *Acta Acustica united with Acustica*, 86(1), 117-128. <https://doi.org/10.3758/s13414-015-0882-9>
- Brungart, D. S., Simpson, B. D. (2002). The effects of spatial separation in distance on the informational and energetic masking of a nearby speech signal. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(2), 664-676. <https://doi.org/10.1121/1.1490592>
- Brungart, D. S., Simpson, B. D. (2007). Cocktail party listening in a dynamic multitalker environment. *Perception & psychophysics*, 69(1), 79-91. <https://doi.org/10.3758/BF03194455>
- Bubic, A., Von Cramon, D. Y., Schubotz, R. I. (2010). Prediction, cognition and the brain. *Frontiers in human neuroscience*, 4, artykuł 25. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00025>
- Bueti, D., Bahrami, B., Walsh, V., Rees, G. (2010). Encoding of temporal probabilities in the human brain. *Journal of Neuroscience*, 30(12), 4343-4352. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2254-09.2010>

- Callejas, A., Lupiáñez, J., Tudela, P. (2004). The three attentional networks: On their independence and interactions. *Brain and cognition*, 54(3), 225-227. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.02.012>
- Carlin, M. A., Elhilali, M. (2015). Modeling attention-driven plasticity in auditory cortical receptive fields. *Frontiers in computational neuroscience*, 9, artykuł 106. <https://doi.org/10.3389/fncom.2015.00106>
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision research*, 51(13), 1484-1525. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.012>
- Castiello, U., Umiltà, C. (1990). Size of the attentional focus and efficiency of processing. *Acta psychologica*, 73(3), 195-209. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(90\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0001-6918(90)90022-8)
- Chelazzi, L., Eštočinová, J., Calletti, R., Gerfo, E. L., Sani, I., Della Libera, C., Santandrea, E. (2014). Altering spatial priority maps via reward-based learning. *Journal of Neuroscience*, 34(25), 8594-8604. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0277-14.2014>
- Chennu, S., Noreika, V., Gueorguiev, D., Blenkmann, A., Kochen, S., Ibáñez, A., ... , Bekinschtein, T. A. (2013). Expectation and attention in hierarchical auditory prediction. *Journal of Neuroscience*, 33(27), 11194-11205. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0114-13.2013>
- Cherry, E. C. (1953). Some experiments on the recognition of speech, with one and with two ears. *The Journal of the acoustical society of America*, 25(5), 975-979. <https://doi.org/10.1121/1.1907229>
- Chi, T., Ru, P., Shamma, S. A. (2005). Multiresolution spectrotemporal analysis of complex sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(2), 887-906. <https://doi.org/10.1121/1.1945807>
- Chica, A. B., Bartolomeo, P., Lupiáñez, J. (2013). Two cognitive and neural systems for endogenous and exogenous spatial attention. *Behavioural brain research*, 237, 107-123. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2012.09.027>

- Chica, A. B., Lupiáñez, J. (2009). Effects of endogenous and exogenous attention on visual processing: an inhibition of return study. *Brain research*, 1278, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.04.011>
- Chica, A. B., Martín-Arévalo, E., Botta, F., Lupiáñez, J. (2014). The Spatial Orienting paradigm: How to design and interpret spatial attention experiments. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 40, 35-51. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.01.002>
- Cichy, R. M., Teng, S. (2017). Resolving the neural dynamics of visual and auditory scene processing in the human brain: a methodological approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1714), artykuł 20160108. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0108>
- Ciocca, V. (2008). The auditory organization of complex sounds. *Frontiers in Bioscience-Landmark*, 13(1), 148-169. <https://doi.org/10.2741/2666>
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and brain sciences*, 36(3), 181-204. <https://doi.org/10.1017/S0140525X12000477>
- Clark, A. (2015). *Surfing uncertainty: Prediction, action, and the embodied mind*. Oxford University Press.
- Cleeremans, A. X. (2006). Conscious and unconscious cognition: A graded, dynamic perspective. W: Q. Jing, M. Rosenzweig, G. d'Ydewalle, H. Zhang, H.-C. Chen, & K. Zhang (red.), *Progress in psychological science around the world: Vol. 1. Neural, cognitive, and developmental issues* (s. 401–418). Hove, England: Psychology Press.
- Clegg, B. A., DiGirolamo, G. J., Keele, S. W. (1998). Sequence learning. *Trends in cognitive sciences*, 2(8), 275-281. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(98\)01202-9](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(98)01202-9)
- Clementz, B. A., Barber, S. K., Dzau, J. R. (2002). Knowledge of stimulus repetition affects the magnitude and spatial distribution of low-frequency event-related brain potentials. *Audiology and Neurotology*, 7(5), 303-314. <https://doi.org/10.1159/000064444>

- Cohen, R. A. (2014). Models and mechanisms of attention. W: R. A. Cohen (red.), *The neuropsychology of attention* (s. 265-280). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-72639-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-0-387-72639-7_11)
- Conway, C. M. (2012). Sequential learning. W: R. M. Seel (red.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (s. 3047-3050). Springer Publications.
- Conway, C. M., Bauernschmidt, A., Huang, S. S., Pisoni, D. B. (2010). Implicit statistical learning in language processing: Word predictability is the key. *Cognition*, 114(3), 356-371. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.009>
- Conway, C. M., Christiansen, M. H. (2001). Sequential learning in non-human primates. *Trends in cognitive sciences*, 5(12), 539-546. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01800-3](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01800-3)
- Conway, C. M., Christiansen, M. H. (2005). Modality-constrained statistical learning of tactile, visual, and auditory sequences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 31(1), 24-39. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.31.1.24>
- Conway, C. M., Christiansen, M. H. (2006). Statistical learning within and between modalities: Pitting abstract against stimulus-specific representations. *Psychological science*, 17(10), 905-912. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01801.x>
- Corbetta, M., Patel, G., Shulman, G. L. (2008). The reorienting system of the human brain: from environment to theory of mind. *Neuron*, 58(3), 306-324. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.04.017>
- Corbetta, M., Shulman, G. L. (2002). Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nature reviews neuroscience*, 3(3), 201-215. <https://doi.org/10.1038/nrn755>
- Cornella, M., Leung, S., Grimm, S., Escera, C. (2012). Detection of simple and pattern regularity violations occurs at different levels of the auditory hierarchy. *PLoS ONE*, 7(8), artykuł e43604. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0043604>
- Correa, Á. (2010). *Enhancing behavioural performance by visual temporal orienting. Attention and time*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199563456.003.0026>

- Correa, A., Cappucci, P., Nobre, A. C., Lupiáñez, J. (2010). The two sides of temporal orienting: Facilitating perceptual selection, disrupting response selection. *Experimental Psychology*, 57(2), 142-148. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000018>
- Correa, Á., Lupiáñez, J., Madrid, E., Tudela, P. (2006). Temporal attention enhances early visual processing: A review and new evidence from event-related potentials. *Brain research*, 1076(1), 116-128. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.11.074>
- Correa, A., Lupiáñez, J., Milliken, B., Tudela, P. (2004). Endogenous temporal orienting of attention in detection and discrimination tasks. *Perception & Psychophysics*, 66(2), 264-278 <https://doi.org/10.3758/BF03194878>
- Correa, Á., Lupiáñez, J., Tudela, P. Í. O. (2005). Attentional preparation based on temporal expectancy modulates processing at the perceptual level. *Psychonomic bulletin & review*, 12(2), 328-334. <https://doi.org/10.3758/bf03196380>
- Correa, A., Nobre, A. C. (2008). Neural modulation by regularity and passage of time. *Journal of Neurophysiology*, 100(3), 1649-1655. <https://doi.org/10.1152/jn.90656.2008>
- Costa-Faidella, J., Baldeweg, T., Grimm, S., Escera, C. (2011). Interactions between “what” and “when” in the auditory system: temporal predictability enhances repetition suppression. *Journal of Neuroscience*, 31(50), 18590-18597. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2599-11.2011>
- Coull, J. T., Frith, C. D., Büchel, C., Nobre, A. C. (2000). Orienting attention in time: behavioural and neuroanatomical distinction between exogenous and endogenous shifts. *Neuropsychologia*, 38(6), 808-819. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(99\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(99)00132-3)
- Coull, J. T., Nobre, A. C. (1998). Where and when to pay attention: the neural systems for directing attention to spatial locations and to time intervals as revealed by both PET and fMRI. *Journal of Neuroscience*, 18(18), 7426-7435. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.18-18-07426.1998>

- Curran, T., Keele, S. W. (1993). Attentional and nonattentional forms of sequence learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19(1), 189. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.19.1.189>
- Curran, T., Schacter, D. L. (2001). Implicit Learning and Memory: Psychological and Neural Aspects. W: N. J Smelser, P. B. Baltes (red.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (s. 7237-7241). USA: Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/03513-0>
- Cusack, R., Decks, J., Aikman, G., Carlyon, R. P. (2004). Effects of location, frequency region, and time course of selective attention on auditory scene analysis. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 30(4), 643-656. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.30.4.643>
- Dalton, D. S., Cruickshanks, K. J., Klein, B. E., Klein, R., Wiley, T. L., Nondahl, D. M. (2003). The impact of hearing loss on quality of life in older adults. *The gerontologist*, 43(5), 661-668. <https://doi.org/10.1093/geront/43.5.661>
- Daltrozzo, J., Conway, C. M. (2014). Neurocognitive mechanisms of statistical-sequential learning: what do event-related potentials tell us? *Frontiers in human neuroscience*, 8, artykuł 437. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00437>
- Darwin, C. J. (2008). Listening to speech in the presence of other sounds. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1493), 1011-1021. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2156>
- David, S. V., Fritz, J. B., Shamma, S. A. (2012). Task reward structure shapes rapid receptive field plasticity in auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(6), 2144-2149. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117717109>
- Dayan, P., Kakade, S., Montague, P. R. (2000). Learning and selective attention. *Nature neuroscience*, 3(11), 1218-1223. <https://doi.org/10.1038/81504>
- Dayan, P., Yu, A. J. (2003). Uncertainty and learning. *IETE Journal of Research*, 49(2-3), 171-181. <https://doi.org/10.1080/03772063.2003.11416335>
- Denham, S. L., Winkler, I. (2006). The role of predictive models in the formation of auditory streams. *Journal of Physiology-Paris*, 100(1-3), 154-170. <https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2006.09.012>



- Delorme, A., Makeig, S. (2004). EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 134, 9-21. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2003.10.009>
- Desimone, R., Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual review of neuroscience*, 18(1), 193-222. <https://doi.org/10.1146/annurev.ne.18.030195.001205>
- Deutsch, J. A., Deutsch, D. (1963). Attention: Some theoretical considerations. *Psychological review*, 70(1), 80-90. <https://doi.org/10.1037/h0039515>
- Devergie, A., Grimault, N., Tillmann, B., Berthommier, F. (2010). Effect of rhythmic attention on the segregation of interleaved melodies. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(1), 1-7. <https://doi.org/10.1121/1.3436498>
- Ding, N., Simon, J. Z. (2012). Emergence of neural encoding of auditory objects while listening to competing speakers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(29), 11854-11859. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205381109>
- Doherty, J. R., Rao, A., Mesulam, M. M., Nobre, A. C. (2005). Synergistic effect of combined temporal and spatial expectations on visual attention. *Journal of Neuroscience*, 25(36), 8259-8266. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1821-05.2005>
- Donchin, E., Coles, M. G. (1988). Is the P300 component a manifestation of context updating?. *Behavioral and brain sciences*, 11(3), 357-374. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00058027>
- Drake, C., Jones, M. R., Baruch, C. (2000). The development of rhythmic attending in auditory sequences: attunement, referent period, focal attending. *Cognition*, 77(3), 251-288. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(00\)00106-2](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(00)00106-2)
- Dryden, A., Allen, H. A., Henshaw, H., Heinrich, A. (2017). The association between cognitive performance and speech-in-noise perception for adult listeners:

- a systematic literature review and meta-analysis. *Trends in hearing*, 21, artykuł 2331216517744675. <https://doi.org/10.1177/2331216517744675>
- Duangudom, V., Anderson, D. V. (2007). Using auditory saliency to interpret complex auditory scenes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 121(5), 3119-3119. <https://doi.org/10.1121/1.4782084>
- Duncan, J., Humphreys, G. W. (1989). Visual search and stimulus similarity. *Psychological review*, 96(3), 433. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.96.3.433>
- Dyson, B. J. (2010). Trial after trial: General processing consequences as a function of repetition and change in multidimensional sound. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(9), 1770-1788. <https://doi.org/10.1080/17470210903514255>
- Dyson, B. J., Alain, C. (2008a). Is a change as good with a rest? Task-dependent effects of inter-trial contingency on concurrent sound segregation. *Brain research*, 1189, 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.10.093>
- Dyson, B. J., Alain, C. (2008b). It all sounds the same to me: Sequential ERP and behavioral effects during pitch and harmonicity judgments. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 8(3), 329-343. <https://doi.org/10.3758/CABN.8.3.329>
- Ebata, M. (2003). Spatial unmasking and attention related to the cocktail party problem. *Acoustical Science and Technology*, 24(5), 208-219. <https://doi.org/10.1250/ast.24.208>
- Egner, T., Summerfield, C. (2013). Grounding predictive coding models in empirical neuroscience research. *Behavioral and Brain Sciences*, 36(3), 210-211. <https://doi.org/10.1017/S0140525X1200218X>
- Eimer, M. (1993). Spatial cueing, sensory gating and selective response preparation: an ERP study on visuo-spatial orienting. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 88(5), 408-420. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(93\)90017-j](https://doi.org/10.1016/0168-5597(93)90017-j)

- Eimer, M. (2014). The neural basis of attentional control in visual search. *Trends in cognitive sciences*, 18(10), 526-535. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.05.005>
- Elhilali, M. (2017). Modeling the cocktail party problem. W: J. Middlebrooks, J. Z. Simon, A. N. Popper, R. R. Fay (red.), *The auditory system at the cocktail party* (s. 111-135). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-51662-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-51662-2_5)
- Elhilali, M., Shamma, S. A. (2008). A cocktail party with a cortical twist: how cortical mechanisms contribute to sound segregation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 3751-3771. <https://doi.org/10.1121/1.3001672>
- Elhilali, M., Shamma, S. A., Simon, J. Z., Fritz, J. B. (2013). A linear systems view to the concept of STRF. W: D. Depireux, M. Elhilali (red.), *Handbook of modern techniques in auditory cortex* (s. 33-60). Nova Science Pub Inc.
- Ellis, D. P. (1999). Using knowledge to organize sound: The prediction-driven approach to computational auditory scene analysis and its application to speech/nonspeech mixtures. *Speech Communication*, 27(3-4), 281-298. <https://doi.org/10.7916/D8029256>
- Emberson, L. L., Conway, C. M., Christiansen, M. H. (2011). Timing is everything: Changes in presentation rate have opposite effects on auditory and visual implicit statistical learning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(5), 1021-1040. <https://doi.org/10.1080/17470218.2010.538972>
- Ericson, M. A., Brungart, D. S., & Simpson, B. D. (2004). Factors that influence intelligibility in multitalker speech displays. *The International Journal of Aviation Psychology*, 14(3), 313-334. [https://doi.org/10.1207/s15327108ijap1403\\_6](https://doi.org/10.1207/s15327108ijap1403_6)
- Erviti, M., Semal, C., Demany, L. (2011). Enhancing a tone by shifting its frequency or intensity. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 129(6), 3837-3845. <https://doi.org/10.1121/1.3589257>
- Esber, G. R., Haselgrove, M. (2011). Reconciling the influence of predictiveness and uncertainty on stimulus salience: a model of attention in associative learning. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1718), 2553-2561. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.0836>

- Escera, C., Leung, S., Grimm, S. (2014). Deviance detection based on regularity encoding along the auditory hierarchy: electrophysiological evidence in humans. *Brain topography*, 27(4), 527-538. <https://doi.org/10.1007/s10548-013-0328-4>
- Evangelopoulos, G., Zlatintsi, A., Potamianos, A., Maragos, P., Rapantzikos, K., Skoumas, G., Avrithis, Y. (2013). Multimodal saliency and fusion for movie summarization based on aural, visual, and textual attention. *IEEE Transactions on Multimedia*, 15(7), 1553-1568. <https://doi.org/10.1109/TMM.2013.2267205>
- Failing, M., Theeuwes, J. (2017). Don't let it distract you: How information about the availability of reward affects attentional selection. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 79(8), 2275-2298. <https://doi.org/10.3758/s13414-017-1376-8>
- Fawcett, J., Risko, E., Kingstone, A. (2015). *The handbook of attention*. MIT Press.
- Fecteau, J. H., Munoz, D. P. (2006). Saliency, relevance, and firing: a priority map for target selection. *Trends in cognitive sciences*, 10(8), 382-390. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2006.06.011>
- Feldman, H., Friston, K. (2010). Attention, uncertainty, and free-energy. *Frontiers in human neuroscience*, 4, artykuł 215. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00215>
- Felleman, D. J., Van Essen, D. C. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral cortex*, 1(1), 1-47. <https://doi.org/10.1093/cercor/1.1.1-a>
- Feintuch, U., Cohen, A. (2002). Visual attention and coactivation of response decisions for features from different dimensions. *Psychological Science*, 13(4), 361-369. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2002.00465.x>
- Ferrante, O., Patacca, A., Di Caro, V., Della Libera, C., Santandrea, E., Chelazzi, L. (2018). Altering spatial priority maps via statistical learning of target selection and distractor filtering. *Cortex*, 102, 67-95. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2017.09.027>
- Filipowicz, A., Valadao, D., Anderson, B., Danckert, J. (2018). Rejecting outliers: Surprising changes do not always improve belief updating. *Decision*, 5(3), 165-176. <https://doi.org/10.1037/dec0000073>

- Forte, A. E., Etard, O., Reichenbach, T. (2017). The human auditory brainstem response to running speech reveals a subcortical mechanism for selective attention. *Elife*, 6, artykuł e27203. <https://doi.org/10.7554/eLife.27203>
- Found, A., Müller, H. J. (1996). Searching for unknown feature targets on more than one dimension: Investigating a “dimension-weighting” account. *Perception & Psychophysics*, 58(1), 88-101. <https://doi.org/10.3758/BF03205479>
- Franconeri, S. L., Alvarez, G. A., Cavanagh, P. (2013). Flexible cognitive resources: competitive content maps for attention and memory. *Trends in cognitive sciences*, 17(3), 134-141. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.01.010>
- Freyman, R. L., Balakrishnan, U., Helfer, K. S. (2001). Spatial release from informational masking in speech recognition. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(5), 2112-2122. <https://doi.org/10.1121/1.1354984>
- Friedman, D., Cycowicz, Y. M., Gaeta, H. (2001). The novelty P3: an event-related brain potential (ERP) sign of the brain's evaluation of novelty. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 25(4), 355-373. [https://doi.org/10.1016/S0149-7634\(01\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0149-7634(01)00019-7)
- Frintrop, S. (2006). *VOCUS: A visual attention system for object detection and goal-directed search* (Vol. 3899). Springer.
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical transactions of the Royal Society B: Biological sciences*, 360(1456), 815-836. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>
- Friston, K. (2009). The free-energy principle: a rough guide to the brain? *Trends in cognitive sciences*, 13(7), 293-301. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.04.005>
- Friston, K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature reviews neuroscience*, 11(2), 127-138. <https://doi.org/10.1038/nrn2787>
- Frith, C. D., Done, D. J. (1986). Routes to action in reaction time tasks. *Psychological research*, 48(3), 169-177. <https://doi.org/10.1007/BF00309165>
- Fritz, J. B., Elhilali, M., David, S. V., Shamma, S. A. (2007a). Auditory attention—focusing the searchlight on sound. *Current opinion in neurobiology*, 17(4), 437-455. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.07.011>

- Fritz, J. B., Elhilali, M., David, S. V., Shamma, S. A. (2007b). Does attention play a role in dynamic receptive field adaptation to changing acoustic salience in A1?. *Hearing research*, 229(1-2), 186-203. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2007.01.009>
- Fritz, J. B., Elhilali, M., Shamma, S. A. (2007c). Adaptive changes in cortical receptive fields induced by attention to complex sounds. *Journal of neurophysiology*, 98(4), 2337-2346. <https://doi.org/10.1152/jn.00552.2007>
- Fu, D., Weber, C., Yang, G., Kerzel, M., Nan, W., Barros, P., ... , Wermter, S. (2020). What can computational models learn from human selective attention? A review from an audiovisual unimodal and crossmodal perspective. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 14, artykuł 10. <https://doi.org/10.3389/fnint.2020.00010>
- Garrido, M. I., Sahani, M., Dolan, R. J. (2013). Outlier responses reflect sensitivity to statistical structure in the human brain. *PLoS computational biology*, 9(3), artykuł e1002999. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002999>
- Gebhart, A. L., Newport, E. L., Aslin, R. N. (2009). Statistical learning of adjacent and nonadjacent dependencies among nonlinguistic sounds. *Psychonomic bulletin & review*, 16(3), 486-490. <https://doi.org/10.3758/PBR.16.3.486>
- George, M. F. S., Bregman, A. S. (1989). Role of predictability of sequence in auditory stream segregation. *Perception & psychophysics*, 46(4), 384-386. <https://doi.org/10.3758/bf03204992>
- Getzmann, S., Lewald, J., Falkenstein, M. (2014). Using auditory pre-information to solve the cocktail-party problem: Electrophysiological evidence for age-specific differences. *Frontiers in neuroscience*, 8, artykuł 413. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00413>
- Gilkey, R., Anderson, T. R. (2014). *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781315806341>
- Godsmark, D., Brown, G. J. (1999). A blackboard architecture for computational auditory scene analysis. *Speech communication*, 27(3-4), 351-366. [https://doi.org/10.1016/S0167-6393\(98\)00082-X](https://doi.org/10.1016/S0167-6393(98)00082-X)
- Goldstein, M. H., Waterfall, H. R., Lotem, A., Halpern, J. Y., Schwade, J. A., Onnis, L., Edelman, S. (2010). General cognitive principles for learning structure in time

- and space. *Trends in cognitive sciences*, 14(6), 249-258.  
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.02.004>
- Golumbic, E. M. Z., Ding, N., Bickel, S., Lakatos, P., Schevon, C. A., McKhann, G. M., ... , Schroeder, C. E. (2013). Mechanisms underlying selective neuronal tracking of attended speech at a “cocktail party”. *Neuron*, 77(5), 980-991.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2012.12.037>
- Gonçalves, A. R., Fernandes, C., Pasion, R., Ferreira-Santos, F., Barbosa, F., Marques-Teixeira, J. (2018). Emotion identification and aging: behavioral and neural age-related changes. *Clinical Neurophysiology*, 129(5), 1020-1029.  
<https://doi.org/10.1016/j.clinph.2018.02.128>
- Goschke, T. (1998). Implicit learning of perceptual and motor sequences: Evidence for independent learning systems. W: M. A. Stadler, P. A. Frensch (red.), *Handbook of implicit learning* (s. 401–444). Sage Publications, Inc.
- Gramann, K., Töllner, T., Müller, H. J. (2010). Dimension-based attention modulates early visual processing. *Psychophysiology*, 47(5), 968-978.  
<https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.00998.x>
- Gregory, R. L. (1980). Perceptions as hypotheses. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 290(1038), 181-197.  
<https://doi.org/10.1098/rstb.1980.0090>
- Griffin, I. C., Miniussi, C., Nobre, K. (2001). Orienting attention in time. *Frontiers in bioscience: a journal and virtual library*, 6(1), 660-671.  
<https://doi.org/10.2741/griffin>
- Griffin, I. C., Miniussi, C., Nobre, A. C. (2002). Multiple mechanisms of selective attention: differential modulation of stimulus processing by attention to space or time. *Neuropsychologia*, 40(13), 2325-2340. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00087-8](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00087-8)
- Griffiths, T. D., Warren, J. D. (2004). What is an auditory object?. *Nature Reviews Neuroscience*, 5(11), 887-892. <https://doi.org/10.1038/nrn1538>
- Grimm, S., Escera, C., Slabu, L., Costa-Faidella, J. (2011). Electrophysiological evidence for the hierarchical organization of auditory change detection in the human

- brain. *Psychophysiology*, 48(3), 377-384. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01073.x>
- Grondin, S. (2010). Timing and time perception: A review of recent behavioral and neuroscience findings and theoretical directions. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(3), 561-582. <https://doi.org/10.3758/APP.72.3.561>
- Grossberg, S., Govindarajan, K. K., Wyse, L. L., Cohen, M. A. (2004). ARTSTREAM: a neural network model of auditory scene analysis and source segregation. *Neural networks*, 17(4), 511-536. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2003.10.002>
- Grotheer, M., Kovács, G. (2016). Can predictive coding explain repetition suppression? *Cortex*, 80, 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2015.11.027>
- Grunwald, T., Boutros, N. N., Pezer, N., von Oertzen, J., Fernández, G., Schaller, C., Elger, C. E. (2003). Neuronal substrates of sensory gating within the human brain. *Biological psychiatry*, 53(6), 511-519. [https://doi.org/10.1016/S0006-3223\(02\)01673-6](https://doi.org/10.1016/S0006-3223(02)01673-6)
- Hackley, S. A., Valle-Inclán, F. (2003). Which stages of processing are speeded by a warning signal?. *Biological psychology*, 64(1-2), 27-45. [https://doi.org/10.1016/S0301-0511\(03\)00101-7](https://doi.org/10.1016/S0301-0511(03)00101-7)
- Hadar, B., Skrzypek, J. E., Wingfield, A., Ben-David, B. M. (2016). Working memory load affects processing time in spoken word recognition: Evidence from eye-movements. *Frontiers in neuroscience*, 10, artykuł 221. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00221>
- Haider, H., Frensch, P. A. (2009). Conflicts between expected and actually performed behavior lead to verbal report of incidentally acquired sequential knowledge. *Psychological Research PRPF*, 73(6), 817-834. <https://doi.org/10.1007/s00426-008-0199-6>
- Häkkinen, S., Ovaska, N., Rinne, T. (2015). Processing of pitch and location in human auditory cortex during visual and auditory tasks. *Frontiers in Psychology*, 6, artykuł 1678. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01678>



- Häkkinen, S., Rinne, T. (2018). Intrinsic, stimulus-driven and task-dependent connectivity in human auditory cortex. *Brain Structure and Function*, 223(5), 2113-2127. <https://doi.org/10.1007/s00429-018-1612-6>
- Hansen, J. C., Hillyard, S. A. (1980). Endogenous brain potentials associated with selective auditory attention. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 49(3-4), 277-290. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(80\)90222-9](https://doi.org/10.1016/0013-4694(80)90222-9)
- Hartmann, W. M., Goupell, M. J. (2006). Enhancing and unmasking the harmonics of a complex tone. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4), 2142-2157. <https://doi.org/10.1121/1.2228476>
- Hawley, M. L., Litovsky, R. Y., Culling, J. F. (2004). The benefit of binaural hearing in a cocktail party: Effect of location and type of interferer. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115(2), 833-843. <https://doi.org/10.1121/1.1639908>
- Hayward, D. A., Ristic, J. (2013). Measuring attention using the Posner cuing paradigm: the role of across and within trial target probabilities. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, artykuł 205. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00205>
- Hesselmann, G., Sadaghiani, S., Friston, K. J., Kleinschmidt, A. (2010). Predictive coding or evidence accumulation? False inference and neuronal fluctuations. *PLoS one*, 5(3), artykuł e9926. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009926>
- Heilbron, M., Chait, M. (2018). Great expectations: is there evidence for predictive coding in auditory cortex? *Neuroscience*, 389, 54-73. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.07.061>
- Henry, M. J., Herrmann, B. (2014). Low-frequency neural oscillations support dynamic attending in temporal context. *Timing & Time Perception*, 2(1), 62-86. <https://doi.org/10.1163/22134468-00002011>
- Herbst, S. K., Obleser, J. (2019). Implicit temporal predictability enhances pitch discrimination sensitivity and biases the phase of delta oscillations in auditory cortex. *NeuroImage*, 203, artykuł 116198. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.116198>

- Higgins, N. C., McLaughlin, S. A., Rinne, T., Stecker, G. C. (2017). Evidence for cue-independent spatial representation in the human auditory cortex during active listening. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), artykuł E7602-E7611. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707522114>
- Hill, K. T., Miller, L. M. (2010). Auditory attentional control and selection during cocktail party listening. *Cerebral cortex*, 20(3), 583-590. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhp124>
- Hillyard, S. A., Kutas, M. (1983). Electrophysiology of cognitive processing. *Annual review of psychology*, 34(1), 33-61. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.34.020183.000341>
- Hillyard, S. A., Hink, R. F., Schwent, V. L., Picton, T. W. (1973). Electrical signs of selective attention in the human brain. *Science*, 182(4108), 177-180. <https://doi.org/10.1126/science.182.4108.177>
- Hillyard, S. A., Picton, T. W., Regan, D. (1978). Sensation, perception and attention: Analysis using ERPs. W: E. Callaway, P. Tueting, S. Koslow (red.), *Event-related brain potentials in man* (s. 223-321). Academic Press.
- Hohwy, J. (2012). Attention and conscious perception in the hypothesis testing brain. *Frontiers in psychology*, 3, artykuł 96. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00096>
- Hohwy, J. (2013). *The predictive mind*. Oxford University Press.
- Hopfinger, J. B., Buonocore, M. H., Mangun, G. R. (2000). The neural mechanisms of top-down attentional control. *Nature neuroscience*, 3(3), 284-291. <https://doi.org/10.1038/72999>
- Hsu, J. (1996). *Multiple comparisons: theory and methods*. CRC Press.
- Hsu, Y. F., Hamalainen, J., Waszak, F. (2014). Both attention and prediction are necessary for adaptive neuronal tuning in sensory processing. *Frontiers in human neuroscience*, 8, artykuł 152. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00152>
- Hughes, G., Desantis, A., Waszak, F. (2013). Mechanisms of intentional binding and sensory attenuation: the role of temporal prediction, temporal control, identity prediction, and motor prediction. *Psychological bulletin*, 139(1), 133-151. <https://doi.org/10.1037/a0028566>

- Ihlefeld, A., Shinn-Cunningham, B. (2008). Disentangling the effects of spatial cues on selection and formation of auditory objects. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *124*(4), 2224-2235. <https://doi.org/10.1121/1.2973185>
- Itti, L., Baldi, P. (2009). Bayesian surprise attracts human attention. *Vision research*, *49*(10), 1295-1306. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.09.007>
- Itti, L., Koch, C. (2000). A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention. *Vision research*, *40*(10-12), 1489-1506. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(99\)00163-7](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(99)00163-7)
- Itti, L., Koch, C. (2001). Feature combination strategies for saliency-based visual attention systems. *Journal of Electronic imaging*, *10*(1), 161-169. <https://doi.org/10.1117/1.1333677>
- Itti, L., Koch, C., Niebur, E. (1998). A model of saliency-based visual attention for rapid scene analysis. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, *20*(11), 1254-1259. <https://doi.org/10.1109/34.730558>
- Jääskeläinen, I. P., Ahveninen, J. (2014). Auditory-cortex short-term plasticity induced by selective attention. *Neural plasticity*, artykuł 216731. <https://doi.org/10.1155/2014/216731>
- Jääskeläinen, I. P., Ahveninen, J., Bonmassar, G., Dale, A. M., Ilmoniemi, R. J., Levänen, S., ... , Belliveau, J. W. (2004). Human posterior auditory cortex gates novel sounds to consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(17), 6809-6814. <https://doi.org/10.1073/pnas.0303760101>
- Jabar, S. B., Filipowicz, A., Anderson, B. (2017). Tuned by experience: How orientation probability modulates early perceptual processing. *Vision Research*, *138*, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2017.07.008>
- James, W. (1890). 1950. *The principles of psychology*, New York: Dover.
- Jiang, Y. V., Capistrano, C. G., Esler, A. N., Swallow, K. M. (2013). Directing attention based on incidental learning in children with autism spectrum disorder. *Neuropsychology*, *27*(2), 161-169. <https://doi.org/10.1037/a0031648>
- Johnson, R. (1986). A triarchic model of P3 amplitude. *Psychophysiology*, *23*, 367-384. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1986.tb00649.x>

- Jones, M. R. (1976). Time, our lost dimension: Toward a new theory of perception, attention, and memory. *Psychological Review*, 83(5), 323–355. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.83.5.323>
- Jones, M. R., Boltz, M., Kidd, G. (1982). Controlled attending as a function of melodic and temporal context. *Perception & Psychophysics*, 32(3), 211-218. <https://doi.org/10.3758/BF03206225>
- Jones, A., Hughes, G., Waszak, F. (2013). The interaction between attention and motor prediction. An ERP study. *Neuroimage*, 83, 533-541. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.07.004>
- Jones, M. R., Kidd, G., Wetzell, R. (1981). Evidence for rhythmic attention. *Journal of experimental psychology: human perception and performance*, 7(5), 1059-1073. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.7.5.1059>
- Jonides, J. (1983). Further toward a model of the mind's eye's movement. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 21(4), 247-250. <https://doi.org/10.3758/BF03334699>
- Kahneman, D. (1973). *Attention and Effort*. Prentice-Hall.
- Kalinli, O., Narayanan, S. S. (27-31 sierpnia 2007). *A saliency-based auditory attention model with applications to unsupervised prominent syllable detection in speech*. INTERSPEECH, Antwerp, Belgium (s. 1941-1944).
- Kalinli, O., Narayanan, S. S. (22-26 września 2008). *Combining task-dependent information with auditory attention cues for prominence detection in speech*. INTERSPEECH, Brisbane, Australia (s. 1064-1067). <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2008-329>
- Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of Basic Engineering*, 82(1), 35-45. <https://doi.org/10.1115/1.3662552>
- Katsuki, F., Constantinidis, C. (2014). Bottom-up and top-down attention: different processes and overlapping neural systems. *The Neuroscientist*, 20(5), 509-521. <https://doi.org/10.1177/1073858413514136>
- Kaya, E. M., Elhilali, M. (21-23 marca 2012). *A temporal saliency map for modeling auditory attention*. 46th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), Princeton, NJ, USA (s. 1-6). <https://doi.org/10.1109/CISS.2012.6310945>

- Kaya, E. M., Elhilali, M. (3-7 lipca 2013). *Abnormality detection in noisy biosignals*. 35th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Osaka, Japonia (s. 3949-3952). <https://doi.org/10.1109/EMBC.2013.6610409>
- Kaya, E. M., Elhilali, M. (2014). Investigating bottom-up auditory attention. *Frontiers in human neuroscience*, 8, artykuł 327. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00327>
- Kaya, E. M., Elhilali, M. (2017). Modelling auditory attention. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1714), artykuł 20160101. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0101>
- Kayser, C., Petkov, C. I., Lippert, M., Logothetis, N. K. (2005). Mechanisms for allocating auditory attention: an auditory saliency map. *Current biology*, 15(21), 1943-1947. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.09.040>
- Key, A. P. F., Dove, G. O., Maguire, M. J. (2005). Linking brainwaves to the brain: an ERP primer. *Developmental neuropsychology*, 27(2), 183-215. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn2702\\_1](https://doi.org/10.1207/s15326942dn2702_1)
- Kidd Jr, G., Arbogast, T. L., Mason, C. R., Gallun, F. J. (2005). The advantage of knowing where to listen. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(6), 3804-3815. <https://doi.org/10.1121/1.2109187>
- Kidd Jr, G., Mason, C. R., Arbogast, T. L., Brungart, D. S., Simpson, B. D. (2003). Informational masking caused by contralateral stimulation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3), 1594-1603. <https://doi.org/10.1121/1.1547440>
- Kingstone, A. (1992). Combining expectancies. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A: Human Experimental Psychology*, 44A(1), 69-104. <https://doi.org/10.1080/14640749208401284>
- Kitterick, P. T., Bailey, P. J., Summerfield, A. Q. (2010). Benefits of knowing who, where, and when in multi-talker listening. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(4), 2498-2508. <https://doi.org/10.1121/1.3327507>

- Knill, D. C., Pouget, A. (2004). The Bayesian brain: the role of uncertainty in neural coding and computation. *TRENDS in Neurosciences*, 27(12), 712-719. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2004.10.007>
- Knudsen, E. I. (2007). Fundamental components of attention. *Annual review of neuroscience*, 30(1), 57-78. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.30.051606.094256>
- Kogo, N., Trengove, C. (2015). Is predictive coding theory articulated enough to be testable?. *Frontiers in computational neuroscience*, 9, artykuł 111. <https://doi.org/10.3389/fncom.2015.00111>
- Kok, P., Rahnev, D., Jehee, J. F., Lau, H. C., De Lange, F. P. (2012). Attention reverses the effect of prediction in silencing sensory signals. *Cerebral cortex*, 22(9), 2197-2206. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhr310>
- Kopp, B., Seer, C., Lange, F., Kluytmans, A., Kolossa, A., Fingscheidt, T., Hoijsink, H. (2016). P3 amplitude variations, prior probabilities, and likelihoods: A Bayesian ERP study. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 16(5), 911-928. <https://doi.org/10.3758/s13415-016-0442-3>
- Kramer, A. F., Hahn, S. (1995). Splitting the beam: Distribution of attention over noncontiguous regions of the visual field. *Psychological Science*, 6(6), 381-386. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1995.tb00530.x>
- Krishnan, L., Elhilali, M., Shamma, S. (2014). Segregating complex sound sources through temporal coherence. *PLoS computational biology*, 10(12), artykuł e1003985. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1003985>
- Król, M., El-Dereby, W. (2015). The clash of expectancies: Does the P300 amplitude reflect both passive and active expectations? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(9), 1723-1734. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.996166>
- Krummenacher, J., Müller, H. J., Heller, D. (2002). Visual search for dimensionally redundant pop-out targets: parallel-coactive processing of dimensions is location specific. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(6), 1303. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.28.6.1303>

- Kutas, M., McCarthy, G., Donchin, E. (1977). Augmenting mental chronometry: the P3 as a measure of stimulus evaluation time. *Science*, 197(4305), 792-795. <https://doi.org/10.1126/science.887923>
- Lampar, A., Lange, K. (2011). Effects of temporal trial-by-trial cuing on early and late stages of auditory processing: evidence from event-related potentials. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 73(6), 1916-1933. <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0149-z>
- Lange, K. (2009). Brain correlates of early auditory processing are attenuated by expectations for time and pitch. *Brain and cognition*, 69(1), 127-137. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.06.004>
- Lange, K. (2010). Can a regular context induce temporal orienting to a target sound?. *International Journal of Psychophysiology*, 78(3), 231-238. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2010.08.003>
- Lange, K. (2012). The temporal orienting P3 effect to non-target stimuli: Does it reflect motor inhibition?. *Biological psychology*, 89(2), 433-443. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.12.010>
- Lange, K. (2013). The ups and downs of temporal orienting: a review of auditory temporal orienting studies and a model associating the heterogeneous findings on the auditory N1 with opposite effects of attention and prediction. *Frontiers in human neuroscience*, 7, artykuł 263. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00263>
- Lange, K., Heil, M. (2008). Temporal attention in the processing of short melodies: Evidence from event-related potentials. *Musicae Scientiae*, 12(1), 27-48. <https://doi.org/10.1177/102986490801200103>
- Lange, K., Krämer, U. M., Röder, B. (2006). Attending points in time and space. *Experimental Brain Research*, 173(1), 130-140. <https://doi.org/10.1007/s00221-006-0372-3>
- Lange, K., Röder, B. (2006). Orienting attention to points in time improves stimulus processing both within and across modalities. *Journal of cognitive neuroscience*, 18(5), 715-729. <https://doi.org/10.1162/jocn.2006.18.5.715>

- Lange, K., Röder, B. (2010). Temporal orienting in audition, touch, and across modalities. W: A. C. Nobre, J. T. Coull (red.), *Attention and time* 393-405. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199563456.003.0028>
- Lange, K., Rösler, F., Röder, B. (2003). Early processing stages are modulated when auditory stimuli are presented at an attended moment in time: An event-related potential study. *Psychophysiology*, 40(5), 806-817. <https://doi.org/10.1111/1469-8986.00081>
- Lange, K., Schnuerch, R. (2014). Challenging perceptual tasks require more attention: The influence of task difficulty on the N1 effect of temporal orienting. *Brain and cognition*, 84(1), 153-163. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2013.12.001>
- Lavie, N. (1995). Perceptual load as a necessary condition for selective attention. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 21(3), 451-468. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.21.3.451>
- Lee, A. K., Larson, E., Maddox, R. K., Shinn-Cunningham, B. G. (2014). Using neuroimaging to understand the cortical mechanisms of auditory selective attention. *Hearing research*, 307, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2013.06.010>
- Lee, A. K., Rajaram, S., Xia, J., Bharadwaj, H., Larson, E., Hämäläinen, M., Shinn-Cunningham, B. G. (2013). Auditory selective attention reveals preparatory activity in different cortical regions for selection based on source location and source pitch. *Frontiers in neuroscience*, 6, artykuł 190. <https://doi.org/10.3389/fnins.2012.00190>
- Lejeune, H., Wearden, J. H. (2009). Vierordt's The Experimental Study of the Time Sense (1868) and its legacy. *European Journal of Cognitive Psychology*, 21(6), 941-960. <https://doi.org/10.1080/09541440802453006>
- Lewald, J., Riederer, K. A., Lentz, T., Meister, I. G. (2008). Processing of sound location in human cortex. *European Journal of Neuroscience*, 27(5), 1261-1270. <https://doi.org/10.1111/j.1460-9568.2008.06094.x>
- Lewald, J., Getzmann, S. (2011). When and where of auditory spatial processing in cortex: a novel approach using electrotomography. *PLoS One*, 6(9), artykuł e25146. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0025146>



- Lewald, J., Getzmann, S. (2015). Electrophysiological correlates of cocktail-party listening. *Behavioural brain research*, 292, 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2015.06.025>
- Lewald, J., Hanenberg, C., Getzmann, S. (2016). Brain correlates of the orientation of auditory spatial attention onto speaker location in a “cocktail-party” situation. *Psychophysiology*, 53(10), 1484-1495. <https://doi.org/10.1111/psyp.12692>
- Lewis, P. A., Miall, R. C. (2009). The precision of temporal judgement: milliseconds, many minutes, and beyond. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1525), 1897-1905. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0020>
- Liegeois-Chauvel, C., Musolino, A., Badier, J. M., Marquis, P., Chauvel, P. (1994). Evoked potentials recorded from the auditory cortex in man: evaluation and topography of the middle latency components. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology/Evoked Potentials Section*, 92(3), 204-214. [https://doi.org/10.1016/0168-5597\(94\)90064-7](https://doi.org/10.1016/0168-5597(94)90064-7)
- Lipp, R., Kitterick, P., Summerfield, Q., Bailey, P. J., Paul-Jordanov, I. (2010). Concurrent sound segregation based on inharmonicity and onset asynchrony. *Neuropsychologia*, 48, 1417–1425. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.01.009>
- Liu, J., Erwin, H., Yang, G. Z. (31 lipca – 5 sierpnia 2011). *Attention driven computational model of the auditory midbrain for sound localization in reverberant environments*. The 2011 International Joint Conference on Neural Networks, San Jose, CA, USA (s. 1251-1258). <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2011.6033367>
- Los, S. A., Horoufchin, H. (2011). Dissociative patterns of foreperiod effects in temporal discrimination and reaction time tasks. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(5), 1009-1020. <https://doi.org/10.1080/17470218.2010.532225>
- Los, S. A., Schut, M. L. (2008). The effective time course of preparation. *Cognitive Psychology*, 57(1), 20-55. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2007.11.001>

- Lu, K., Xu, Y., Yin, P., Oxenham, A. J., Fritz, J. B., Shamma, S. A. (2017). Temporal coherence structure rapidly shapes neuronal interactions. *Nature communications*, 8(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/ncomms13900>
- Luck, S. A. (2005). *An introduction to the event-related potential technique*. The MIT Press.
- Mackintosh, N. J. (1975). A theory of attention: Variations in the associability of stimuli with reinforcement. *Psychological review*, 82(4), 276. <https://doi.org/10.1037/h0076778>
- Maljkovic, V., Nakayama, K. (1994). Priming of pop-out: I. Role of features. *Memory & cognition*, 22(6), 657-672. <https://doi.org/10.3758/BF03209251>
- Maljkovic, V., Nakayama, K. E. N. (1996). Priming of pop-out: II. The role of position. *Perception & psychophysics*, 58(7), 977-991. <https://doi.org/10.3758/BF03206826>
- Mangun, G. R., Hillyard, S. A. (1991). Modulations of sensory-evoked brain potentials indicate changes in perceptual processing during visual-spatial priming. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17(4), 1057–1074. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.17.4.1057>
- Marrone, N., Mason, C. R., Kidd Jr, G. (2008a). The effects of hearing loss and age on the benefit of spatial separation between multiple talkers in reverberant rooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(5), 3064-3075. <https://doi.org/10.1121/1.2980441>
- Marrone, N., Mason, C. R., Kidd Jr, G. (2008b). Tuning in the spatial dimension: Evidence from a masked speech identification task. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(2), 1146-1158. <https://doi.org/10.1121/1.2945710>
- Marsh, J. E., Campbell, T. A. (2016). Processing complex sounds passing through the rostral brainstem: The new early filter model. *Frontiers in Neuroscience*, 10, artykuł 136. <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00136>
- Mates, J., Müller, U., Radil, T., Pöppel, E. (1994). Temporal integration in sensorimotor synchronization. *Journal of cognitive neuroscience*, 6(4), 332-340. <https://doi.org/10.1162/jocn.1994.6.4.332>

- Matthias, E., Bublak, P., Müller, H. J., Schneider, W. X., Krummenacher, J., Finke, K. (2010). The influence of alertness on spatial and nonspatial components of visual attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 36(1), 38-56. <https://doi.org/10.1037/a0017602>
- May, P. J., Tiitinen, H. (2010). Mismatch negativity (MMN), the deviance-elicited auditory deflection, explained. *Psychophysiology*, 47(1), 66-122. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2009.00856.x>
- Mayer, A. R., Harrington, D., Adair, J. C., Lee, R. (2006). The neural networks underlying endogenous auditory covert orienting and reorienting. *Neuroimage*, 30(3), 938-949. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.10.050>
- McDermott, J. H., Schemitsch, M., Simoncelli, E. P. (2013). Summary statistics in auditory perception. *Nature neuroscience*, 16(4), 493-498. <https://doi.org/10.1038/nn.3347>
- McDonald, K. L., Alain, C. (2005). Contribution of harmonicity and location to auditory object formation in free field: evidence from event-related brain potentials. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(3), 1593-1604. <https://doi.org/10.1121/1.2000747>
- Mesgarani, N., Chang, E. F. (2012). Selective cortical representation of attended speaker in multi-talker speech perception. *Nature*, 485(7397), 233-236. <https://doi.org/10.1038/nature11020>
- Mesgarani, N., Fritz, J., Shamma, S. (2010). A computational model of rapid task-related plasticity of auditory cortical receptive fields. *Journal of computational neuroscience*, 28(1), 19-27. <https://doi.org/10.1007/s10827-009-0181-3>
- Meyniel, F., Schlunegger, D., Dehaene, S. (2015). The sense of confidence during probabilistic learning: A normative account. *PLoS computational biology*, 11(6), artykuł e1004305. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1004305>
- Michie, P. T. (1984). Selective attention effects on somatosensory event-related potentials. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 425, 250-255. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.1984.tb23542.x>

- Michie, P. T., Bearpark, H. M., Crawford, J. M., Glue, L. C. (1990). The nature of selective attention effects on auditory event-related potentials. *Biological psychology*, 30(3), 219-250. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(90\)90141-i](https://doi.org/10.1016/0301-0511(90)90141-i)
- Mill, R. W., Böhm, T. M., Bendixen, A., Winkler, I., Denham, S. L. (2013). Modelling the emergence and dynamics of perceptual organisation in auditory streaming. *PLoS computational biology*, 9(3), artykuł e1002925. <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1002925>
- Miniussi, C., Wilding, E. L., Coull, J. T., Nobre, A. C. (1999). Orienting attention in time: Modulation of brain potentials. *Brain*, 122(8), 1507-1518. <https://doi.org/10.1093/brain/122.8.1507>
- Mondor, T. A., Zatorre, R. J. (1995). Shifting and focusing auditory spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21(2), 387-409. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.21.2.387>
- Mondor, T. A., Zatorre, R. J., Terrio, N. A. (1998). Constraints on the selection of auditory information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(1), 66-79. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.1.66>
- Mortier, K., Theeuwes, J., Starreveld, P. (2005). Response selection modulates visual search within and across dimensions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(3), 542-557. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.31.3.542>
- Moore, B. C. J. (2013). *An Introduction to the Psychology of Hearing. Sixth Edition.* Emerald Group Publishing Limited.
- Mullen, T. R., Kothe, C. A., Chi, Y. M., Ojeda, A., Kerth, T., Makeig, S., ... , Cauwenberghs, G. (2015). Real-time neuroimaging and cognitive monitoring using wearable dry EEG. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(11), 2553-2567. <https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2481482>
- Müller, H. J., Reimann, B., Krummenacher, J. (2003). Visual search for singleton feature targets across dimensions: Stimulus- and expectancy-driven effects in dimensional weighting. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 29(5), 1021-1035. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.29.5.1021>

- Müller, H. J., Töllner, T., Zehetleitner, M., Geyer, T., Rangelov, D., Krummenacher, J. (2010). Dimension-based attention modulates feed-forward visual processing. *Acta psychologica*, 135(2), 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2010.05.004>
- Müller, D., Widmann, A., Schröger, E. (2005). Auditory streaming affects the processing of successive deviant and standard sounds. *Psychophysiology*, 42(6), 668-676. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00355.x>
- Mumford, D. (1992). On the computational architecture of the neocortex. *Biological cybernetics*, 66(3), 241-251. <https://doi.org/10.1007/BF00198477>
- Murray, S. O., Kersten, D., Olshausen, B. A., Schrater, P., Woods, D. L. (2002). Shape perception reduces activity in human primary visual cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(23), 15164-15169. <https://doi.org/10.1073/pnas.192579399>
- Näätänen, R. (1970). The diminishing time-uncertainty with the lapse of time after the warning signal in reaction-time experiments with varying fore-periods. *Acta psychologica*, 34, 399-419. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(70\)90035-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(70)90035-1)
- Näätänen, R. (1972). Time uncertainty and occurrence uncertainty of the stimulus in a simple reaction time task. *Acta Psychologica*, 36(6), 492-503. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(72\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0001-6918(72)90029-7)
- Näätänen, R. (1975). Selective attention and evoked potentials in humans—A critical review. *Biological Psychology*, 2(4), 237-307. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(75\)90038-1](https://doi.org/10.1016/0301-0511(75)90038-1)
- Näätänen, R. (1982). Processing negativity: An evoked-potential reflection. *Psychological bulletin*, 92(3), 605. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.92.3.605>
- Näätänen, R., Astikainen, P., Ruusuvirta, T., Huotilainen, M. (2010). Automatic auditory intelligence: An expression of the sensory-cognitive core of cognitive processes. *Brain research reviews*, 64(1), 123-136. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2010.03.001>
- Näätänen, R., Gaillard, A. W., Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta psychologica*, 42(4), 313-329. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(78\)90006-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(78)90006-9)

- Näätänen, R., Jacobsen, T., Winkler, I. (2005). Memory-based or afferent processes in mismatch negativity (MMN): A review of the evidence. *Psychophysiology*, 42(1), 25-32. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2005.00256.x>
- Näätänen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: a review. *Clinical neurophysiology*, 118(12), 2544-2590. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.026>
- Näätänen, R., Picton, T. (1987). The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure. *Psychophysiology*, 24(4), 375-425. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1987.tb00311.x>
- Näätänen, R., Tervaniemi, M., Sussman, E., Paavilainen, P., Winkler, I. (2001). 'Primitive intelligence' in the auditory cortex. *Trends in neurosciences*, 24(5), 283-288. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01790-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01790-2)
- Nager, W., Teder-Sälejärvi, W., Kunze, S., Münte, T. F. (2003). Preattentive evaluation of multiple perceptual streams in human audition. *Neuroreport*, 14(6), 871-874. <https://doi.org/10.1097/00001756-200305060-00019>
- Navalpakkam, V., Itti, L. (2005). Modeling the influence of task on attention. *Vision research*, 45(2), 205-231. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.07.042>
- Nelken, I. (2004). Processing of complex stimuli and natural scenes in the auditory cortex. *Current opinion in neurobiology*, 14(4), 474-480. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.06.005>
- Nobre, A. C., Correa, A., Coull, J. T. (2007). The hazards of time. *Current opinion in neurobiology*, 17(4), 465-470. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2007.07.006>
- Paavilainen, P. (2013). The mismatch-negativity (MMN) component of the auditory event-related potential to violations of abstract regularities: a review. *International journal of psychophysiology*, 88(2), 109-123. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2013.03.015>
- Patil, K., Elhilali, M. (26-31 maja 2013). *Task-driven attentional mechanisms for auditory scene recognition*. 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and

- Signal Processing*, Vancouver, BC, Kanada (s. 828-832).  
<https://doi.org/10.1109/ICASSP.2013.6637764>
- Pearce, J. M., Mackintosh, N. J. (2010). Two theories of attention: A review and a possible integration. W: C. J. Mitchell, M. E. Le Pelley (red.), *Attention and associative learning: From brain to behaviour* (s. 11-39). Oxford University Press.
- Petersen, S. E., Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual review of neuroscience*, 35, 73-89. <https://doi.org/10.1146/annurev-neuro-062111-150525>
- Petkov, C. I., Kang, X., Alho, K., Bertrand, O., Yund, E. W., Woods, D. L. (2004). Attentional modulation of human auditory cortex. *Nature neuroscience*, 7(6), 658-663. <https://doi.org/10.1038/nn1256>
- Picton, T. W. (1992). The P3 wave of the human event-related potential. *Journal of clinical neurophysiology*, 9(4), 456-479. <https://doi.org/10.1097/00004691-199210000-00002>
- Picton, T. W., Hillyard, S. A. (1974). Human auditory evoked potentials. II: Effects of attention. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 36, 191-200. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(74\)90156-4](https://doi.org/10.1016/0013-4694(74)90156-4)
- Picton, T. W., Hillyard, S. A., Galambos, R. (1976). Habituation and attention in the auditory system. W: W. D. Keidel, W. D. Neff (red.), *Auditory System. Handbook of Sensory Physiology* (s. 343-389). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-66082-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-642-66082-5_8)
- Pichora-Fuller, K. M. (2008). Use of supportive context by younger and older adult listeners: Balancing bottom-up and top-down information processing. *International journal of audiology*, 47(sup2), artykuł S72-S82. <https://doi.org/10.1080/14992020802307404>
- Piras, F., Coull, J. T. (2011). Implicit, predictive timing draws upon the same scalar representation of time as explicit timing. *PLoS One*, 6(3), artykuł e18203. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018203>
- Podwinska, Z. (2020). *Spatial aspects of auditory salience* [rozprawa doktorska, University of Salford (United Kingdom)]. ProQuest Dissertations & Theses A&I.

<https://www.proquest.com/dissertations-theses/spatial-aspects-auditory-salience/docview/2564122069/se-2>

- Pollmann, S., Weidner, R., Müller, H. J., Yves von Cramon, D. (2006). Neural correlates of visual dimension weighting. *Visual cognition*, 14(4-8), 877-897. <https://doi.org/10.1080/13506280500196142>
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly journal of experimental psychology*, 32(1), 3-25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Press, C., Kok, P., Yon, D. (2020). The perceptual prediction paradox. *Trends in Cognitive Sciences*, 24(1), 13-24. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2019.11.003>
- Pressnitzer, D., Sayles, M., Micheyl, C., Winter, I. M. (2008). Perceptual organization of sound begins in the auditory periphery. *Current Biology*, 18(15), 1124-1128. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.06.053>
- Price, C. N., Alain, C., Bidelman, G. M. (2019). Auditory-frontal channeling in  $\alpha$  and  $\beta$  bands is altered by age-related hearing loss and relates to speech perception in noise. *Neuroscience*, 423, 18-28. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.10.044>
- Price, C. N., Moncrieff, D. (2021). Defining the Role of Attention in Hierarchical Auditory Processing. *Audiology Research*, 11(1), 112-128. <https://doi.org/10.3390/audiolres11010012>
- Ramenahalli, S., Mendat, D. R., Dura-Bernal, S., Culurciello, E., Niebur, E., Andreou, A. (20-22 marca 2013). *Audio-visual saliency map: Overview, basic models and hardware implementation. 47th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, Baltimore, MD, USA (s. 1-6). <https://doi.org/10.1109/CISS.2013.6552285>
- Rao, R. P. (2005). Bayesian inference and attentional modulation in the visual cortex. *Neuroreport*, 16(16), 1843-1848. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000183900.92901.fc>
- Rao, R. P., Ballard, D. H. (1999). Predictive coding in the visual cortex: a functional interpretation of some extra-classical receptive-field effects. *Nature neuroscience*, 2(1), 79-87. <https://doi.org/10.1038/4580>



- Rao, R. P., Ballard, D. H. (2005). Probabilistic models of attention based on iconic representations and predictive coding. W: L. Itti, G. Rees i J. K. Tsotsos (red.), *Neurobiology of attention* (s. 553-561). Elsevier Academic Press.
- Rauschecker, J. P., Tian, B. (2000). Mechanisms and streams for processing of “what” and “where” in auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(22), 11800-11806. <https://doi.org/10.1073/pnas.97.22.11800>
- Rauss, K., Pourtois, G., Vuilleumier, P., Schwartz, S. (2012). Effects of attentional load on early visual processing depend on stimulus timing. *Human brain mapping*, 33(1), 63-74. <https://doi.org/10.1002/hbm.21193>
- Reber, A.S. (1993). *Implicit learning and tacit knowledge*. Oxford University Press.
- Recanzone, G. H. (2011). The biological basis of audition. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 2(4), 408-418. <https://doi.org/10.1002/wcs.118>
- Recanzone, G. H., Cohen, Y. E. (2010). Serial and parallel processing in the primate auditory cortex revisited. *Behavioural brain research*, 206(1), 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2009.08.015>
- Regev, M., Simony, E., Lee, K., Tan, K. M., Chen, J., Hasson, U. (2019). Propagation of information along the cortical hierarchy as a function of attention while reading and listening to stories. *Cerebral Cortex*, 29(10), 4017-4034. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhy282>
- Rimmele, J., Jolsvai, H., Sussman, E. (2011). Auditory target detection is affected by implicit temporal and spatial expectations. *Journal of cognitive neuroscience*, 23(5), 1136-1147. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21437>
- Rimmele, J., Schröger, E., Bendixen, A. (2012). Age-related changes in the use of regular patterns for auditory scene analysis. *Hearing research*, 289(1-2), 98-107. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2012.04.006>
- Rogers, W. L., Bregman, A. S. (1993). An experimental evaluation of three theories of auditory stream segregation. *Perception & psychophysics*, 53(2), 179-189. <https://doi.org/10.3758/BF03211728>

- Rohenkohl, G., Nobre, A. C. (2011). Alpha oscillations related to anticipatory attention follow temporal expectations. *Journal of Neuroscience*, *31*(40), 14076-14084. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3387-11.2011>
- Rolke, B. (2008). Temporal preparation facilitates perceptual identification of letters. *Perception & Psychophysics*, *70*(7), 1305-1313. <https://doi.org/10.3758/PP.70.7.1305>
- Rolke, B., Festl, F., Seibold, V. C. (2016). Toward the influence of temporal attention on the selection of targets in a visual search task: An ERP study. *Psychophysiology*, *53*(11), 1690-1701. <https://doi.org/10.1111/psyp.12734>
- Sach, A. J., Hill, N. I., Bailey, P. J. (2000). Auditory spatial attention using interaural time differences. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *26*(2), 717-729. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.26.2.717>
- Saffran, J. R., Aslin, R. N., Newport, E. L. (1996). Statistical learning by 8-month-old infants. *Science*, *274*(5294), 1926-1928. <https://doi.org/10.1126/science.274.5294.1926>
- Saffran, J. R., Johnson, E. K., Aslin, R. N., Newport, E. L. (1999). Statistical learning of tone sequences by human infants and adults. *Cognition*, *70*(1), 27-52. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(98\)00075-4](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(98)00075-4)
- Saffran, J. R., Newport, E. L., Aslin, R. N., Tunick, R. A., Barrueco, S. (1997). Incidental language learning: Listening (and learning) out of the corner of your ear. *Psychological science*, *8*(2), 101-105. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1997.tb00690.x>
- Saiz-Alía, M., Forte, A. E., Reichenbach, T. (2019). Individual differences in the attentional modulation of the human auditory brainstem response to speech inform on speech-in-noise deficits. *Scientific Reports*, *9*(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50773-1>
- Sanabria, D., Correa, Á. (2013). Electrophysiological evidence of temporal preparation driven by rhythms in audition. *Biological psychology*, *92*(2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2012.11.012>

- Sanders, L. D., Astheimer, L. B. (2008). Temporally selective attention modulates early perceptual processing: Event-related potential evidence. *Perception & psychophysics*, 70(4), 732-742. <https://doi.org/10.3758/PP.70.4.732>
- Schadwinkel, S., Gutschalk, A. (2010). Activity associated with stream segregation in human auditory cortex is similar for spatial and pitch cues. *Cerebral Cortex*, 20(12), 2863-2873. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq037>
- Schafer, E. W., Amochaev, A., Russell, M. J. (1981). Knowledge of stimulus timing attenuates human evoked cortical potentials. *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, 52(1), 9-17. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(81\)90183-8](https://doi.org/10.1016/0013-4694(81)90183-8)
- Scherg, M., Vajsar, J., Picton, T. W. (1989). A source analysis of the late human auditory evoked potentials. *Journal of cognitive neuroscience*, 1(4), 336-355. <https://doi.org/10.1162/jocn.1989.1.4.336>
- Schönwiesner, M., Krumbholz, K., RübSamen, R., Fink, G. R., von Cramon, D. Y. (2007). Hemispheric asymmetry for auditory processing in the human auditory brain stem, thalamus, and cortex. *Cerebral Cortex*, 17(2), 492-499. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhj165>
- Schröger, E. (1993). Event-related potentials to auditory stimuli following transient shifts of spatial attention in a Go/Nogo task. *Biological psychology*, 36(3), 183-207. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(93\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0301-0511(93)90017-3)
- Schröger, E. (1994). Human brain potential signs of selection by location and frequency in an auditory transient attention situation. *Neuroscience Letters*, 173(1-2), 163-166. [https://doi.org/10.1016/0304-3940\(94\)90174-0](https://doi.org/10.1016/0304-3940(94)90174-0)
- Schröger, E. (1998). Measurement and interpretation of the mismatch negativity. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 30(1), 131-145. <https://doi.org/10.3758/BF03209423>
- Schröger, E., Bendixen, A., Denham, S. L., Mill, R. W., Böhm, T. M., Winkler, I. (2014). Predictive regularity representations in violation detection and auditory stream segregation: from conceptual to computational models. *Brain topography*, 27(4), 565-577. <https://doi.org/10.1007/s10548-013-0334-6>

- Schröger, E., Eimer, M. (1997). Endogenous covert spatial orienting in audition cost-benefit analyses of reaction times and event related potentials. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 50(2), 457-474. <https://doi.org/10.1080/027249897392189>
- Schröger, E., Marzecová, A., SanMiguel, I. (2015). Attention and prediction in human audition: a lesson from cognitive psychophysiology. *European Journal of Neuroscience*, 41(5), 641-664. <https://doi.org/10.1111/ejn.12816>
- Schreiner, C. E. (1998). Spatial distribution of responses to simple and complex sounds in the primary auditory cortex. *Audiology and Neurotology*, 3(2-3), 104-122. <https://doi.org/10.1159/000013785>
- Schubotz, R. I. (2007). Prediction of external events with our motor system: towards a new framework. *Trends in cognitive sciences*, 11(5), 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.02.006>
- Schubotz, R. I., von Cramon, D. Y., Lohmann, G. (2003). Auditory what, where, and when: a sensory somatotopy in lateral premotor cortex. *Neuroimage*, 20(1), 173-185. [https://doi.org/10.1016/S1053-8119\(03\)00218-0](https://doi.org/10.1016/S1053-8119(03)00218-0)
- Schwartz, A. H., Shinn-Cunningham, B. G. (2010). Dissociation of perceptual judgments of “what” and “where” in an ambiguous auditory scene. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 128(5), 3041-3051. <https://doi.org/10.1121/1.3495942>
- Schwartz, M., Farrugia, N., Kotz, S. A. (2013). Dissociation of formal and temporal predictability in early auditory evoked potentials. *Neuropsychologia*, 51(2), 320-325. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.09.037>
- Schwartz, M., Rothermich, K., Schmidt-Kassow, M., Kotz, S. A. (2011). Temporal regularity effects on pre-attentive and attentive processing of deviance. *Biological psychology*, 87(1), 146-151. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.02.021>
- Scott, S. K. (2005). Auditory processing—speech, space and auditory objects. *Current opinion in neurobiology*, 15(2), 197-201. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2005.03.009>

- Seer, C., Lange, F., Boos, M., Dengler, R., Kopp, B. (2016). Prior probabilities modulate cortical surprise responses: a study of event-related potentials. *Brain and cognition*, 106, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2016.04.011>
- Seibold, V. C., Rolke, B. (2014a). Does temporal preparation facilitate visual processing in a selective manner? Evidence from attentional capture. *Acta Psychologica*, 151, 51-61. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.05.012>
- Seibold, V. C., Rolke, B. (2014b). Does temporal preparation speed up visual processing? Evidence from the N2pc. *Psychophysiology*, 51(6), 529-538. <https://doi.org/10.1111/psyp.12196>
- Shamma, S. A., Elhilali, M., Micheyl, C. (2011). Temporal coherence and attention in auditory scene analysis. *Trends in neurosciences*, 34(3), 114-123. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2010.11.002>
- Shamma, S., Fritz, J. (2014). Adaptive auditory computations. *Current opinion in neurobiology*, 25, 164-168. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.01.011>
- Shanks, D. R., Perruchet, P. (2002). Dissociation between priming and recognition in the expression of sequential knowledge. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(2), 362-367. <https://doi.org/10.3758/BF03196294>
- Shi, Z., Church, R. M., Meck, W. H. (2013). Bayesian optimization of time perception. *Trends in cognitive sciences*, 17(11), 556-564. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2013.09.009>
- Shinn-Cunningham, B. G. (2008). Object-based auditory and visual attention. *Trends in cognitive sciences*, 12(5), 182-186. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.02.003>
- Shinn-Cunningham, B. G., Best, V. (2008). Selective attention in normal and impaired hearing. *Trends in amplification*, 12(4), 283-299. <https://doi.org/10.1177/1084713808325306>
- Sidaty, N. O., Larabi, M. C., Saadane, A. (2016). An audiovisual saliency model for conferencing and conversation videos. *Electronic Imaging*, 2016(13), 1-6. <https://doi.org/10.2352/ISSN.2470-1173.2016.13.IQSP-217>

- Sohoglu, E., Chait, M. (2016). Detecting and representing predictable structure during auditory scene analysis. *Elife*, 5, artykuł e19113. <https://doi.org/10.7554/eLife.19113>
- Soltani, M., Knight, R. T. (2000). Neural origins of the P300. *Critical Reviews™ in Neurobiology*, 14(3-4). <https://doi.org/10.1615/CritRevNeurobiol.v14.i3-4.20>
- Song, S., Howard, J. H., Howard, D. V. (2007). Implicit probabilistic sequence learning is independent of explicit awareness. *Learning & Memory*, 14(3), 167-176. <https://doi.org/10.1101/lm.437407>
- Southwell, R., Baumann, A., Gal, C., Barascud, N., Friston, K., Chait, M. (2017). Is predictability salient? A study of attentional capture by auditory patterns. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 372(1714), artykuł 20160105. <https://doi.org/10.1098/rstb.2016.0105>
- Spence, C. J., Driver, J. (1994). Covert spatial orienting in audition: Exogenous and endogenous mechanisms. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 20(3), 555-574. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.20.3.555>
- Spence, C., Driver, J. (1996). Audiovisual links in endogenous covert spatial attention. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(4), 1005-1030. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.22.4.1005>
- Sperduti, M., Tallon-Baudry, C., Hugueville, L., Pouthas, V. (2011). Time is more than a sensory feature: attending to duration triggers specific anticipatory activity. *Cognitive Neuroscience*, 2(1), 11-18. <https://doi.org/10.1080/17588928.2010.513433>
- Spieler, L., Bernasconi, F., Grivel, J. (2009). The temporoparietal junction as a part of the “when” pathway. *Journal of Neuroscience*, 29(27), 8630-8632. <https://doi.org/10.1523/jneurosci.2111-09.2009>
- Spratling, M. W. (2008a). Predictive coding as a model of biased competition in visual attention. *Vision research*, 48(12), 1391-1408. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.03.009>

- Spratling, M. W. (2008b). Reconciling predictive coding and biased competition models of cortical function. *Frontiers in computational neuroscience*, 2, artykuł 4. <https://doi.org/10.3389/neuro.10.004.2008>
- Spratling, M. W. (2010). Predictive coding as a model of response properties in cortical area V1. *Journal of neuroscience*, 30(9), 3531-3543. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4911-09.2010>
- Starr, A., Golob, E. J. (2006). Cognitive factors modulating auditory cortical potentials. W: R.F. Burkard, J.J. Eggermont, M. Don (red.), *Auditory Evoked Potentials: Basic Principles and Clinical Application* (s. 508-525). Lippincott Williams & Wilkins.
- Steinborn, M. B., Langner, R., Huestegge, L. (2017). Mobilizing cognition for speeded action: try-harder instructions promote motivated readiness in the constant-foreperiod paradigm. *Psychological research*, 81(6), 1135-1151. <https://doi.org/10.1007/s00426-016-0810-1>
- Steinborn, M. B., Rolke, B., Bratzke, D., Ulrich, R. (2009). Dynamic adjustment of temporal preparation: Shifting warning signal modality attenuates the sequential foreperiod effect. *Acta Psychologica*, 132(1), 40-47. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2009.06.002>
- Summerfield, C., De Lange, F. P. (2014). Expectation in perceptual decision making: neural and computational mechanisms. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(11), 745-756. <https://doi.org/10.1038/nrn3838>
- Summerfield, C., Egner, T. (2009). Expectation (and attention) in visual cognition. *Trends in cognitive sciences*, 13(9), 403-409. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.06.003>
- Summerfield, C., Egner, T. (2016). Feature-based attention and feature-based expectation. *Trends in cognitive sciences*, 20(6), 401-404. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2016.03.008>
- Summerfield, Q., Sidwell, A., Nelson, T. (1987). Auditory enhancement of changes in spectral amplitude. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81(3), 700-708. <https://doi.org/10.1121/1.394838>
- Sur, S., Sinha, V. K. (2009). Event-related potential: An overview. *Industrial psychiatry journal*, 18(1), 70. <https://doi.org/10.4103/0972-6748.57865>

- Sussman, E. S. (2007). A new view on the MMN and attention debate. *Journal of Psychophysiology*, 21(3-4), 164. <https://doi.org/10.1027/0269-8803.21.34.164>
- Sussman, E. S. (2017). Auditory scene analysis: an attention perspective. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 60(10), 2989-3000. [https://doi.org/10.1044/2017\\_JSLHR-H-17-0041](https://doi.org/10.1044/2017_JSLHR-H-17-0041)
- Sussman, E. S., Bregman, A. S., Wang, W. J., Khan, F. J. (2005). Attentional modulation of electrophysiological activity in auditory cortex for unattended sounds within multistream auditory environments. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 5(1), 93-110. <https://doi.org/10.3758/cabn.5.1.93>
- Sussman, E. S., Gumenyuk, V. (2005). Organization of sequential sounds in auditory memory. *Neuroreport*, 16(13), 1519-1523. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000177002.35193.4c>
- Sussman, E., Ritter, W., Vaughan, H. G. (1999). An investigation of the auditory streaming effect using event-related brain potentials. *Psychophysiology*, 36(1), 22-34. <https://doi.org/10.1017/S0048577299971056>
- Szewczyk, M., Wojtasiński, M. (2021). Umysł przewidujący, czyli o interakcji między predykcją a uwagą. W: P. Fortuna, M. Szewczyk, *Piękno umysłów. Pamięci profesora Piotra Francuza* (s. 55-77). Towarzystwo Naukowe KUL.
- Tanoue, R. T., Berryhill, M. E. (2012). The mental wormhole: internal attention shifts without regard for distance. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74(6), 1199-1215. <https://doi.org/10.3758/s13414-012-0305-0>
- Tavano, A., Widmann, A., Bendixen, A., Trujillo-Barreto, N., Schröger, E. (2014). Temporal regularity facilitates higher-order sensory predictions in fast auditory sequences. *European journal of neuroscience*, 39(2), 308-318. <https://doi.org/10.1111/ejn.12404>
- Tervaniemi, M., Saarinen, J., Paavilainen, P., Danilova, N., Näätänen, R. (1994). Temporal integration of auditory information in sensory memory as reflected by the mismatch negativity. *Biological psychology*, 38(2-3), 157-167. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(94\)90036-1](https://doi.org/10.1016/0301-0511(94)90036-1)



- Theeuwes, J. (1993). Visual selective attention: A theoretical analysis. *Acta psychologica*, 83(2), 93-154. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(93\)90042-P](https://doi.org/10.1016/0001-6918(93)90042-P)
- Theeuwes, J., Reimann, B., Mortier, K. (2006). Visual search for featural singletons: No top-down modulation, only bottom-up priming. *Visual Cognition*, 14(4-8), 466-489. <https://doi.org/10.1080/13506280500195110>
- Theunissen, F. E., Elie, J. E. (2014). Neural processing of natural sounds. *Nature Reviews Neuroscience*, 15(6), 355-366. <https://doi.org/10.1038/nrn3731>
- Thomaschke, R., Hoffmann, J., Haering, C., Kiesel, A. (2016). Time-based expectancy for task relevant stimulus features. *Timing & Time Perception*, 4(3), 248-270. <https://doi.org/10.1163/22134468-00002069>
- Tiitinen, H., May, P., Reinikainen, K., Näätänen, R. (1994). Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature*, 372(6501), 90-92. <https://doi.org/10.1038/372090a0>
- Tomé, D., Barbosa, F., Nowak, K., Marques-Teixeira, J. (2015). The development of the N1 and N2 components in auditory oddball paradigms: a systematic review with narrative analysis and suggested normative values. *Journal of neural transmission*, 122(3), 375-391. <https://doi.org/10.1007/s00702-014-1258-3>
- Tordini, F., Bregman, A. S., Cooperstock, J. R., Ankolekar, A., Sandholm, T. (6-10 lipca 2013). *Toward an improved model of auditory saliency*. International conference on auditory display, Łódź, Polska.
- Tordini, F., Bregman, A. S., Cooperstock, J. R. (8-10 lipca 2015). *The loud bird doesn't (always) get the worm: Why computational salience also needs brightness and tempo*. The 21th International Conference on Auditory Display (ICAD-2015), Graz, Austria.
- Töllner, T., Gramann, K., Müller, H. J., Kiss, M., Eimer, M. (2008). Electrophysiological markers of visual dimension changes and response changes. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34(3), 531. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.34.3.531>
- Töllner, T., Rangelov, D., Müller, H. J. (2012). How the speed of motor-response decisions, but not focal-attentional selection, differs as a function of task set and target

- prevalence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(28), artykuł E1990-E1999. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206382109>
- Treisman, A. M. (1960). Contextual cues in selective listening. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 12(4), 242-248. <https://doi.org/10.1080/17470216008416732>
- Treisman, A. M., Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive psychology*, 12(1), 97-136. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(80\)90005-5](https://doi.org/10.1016/0010-0285(80)90005-5)
- Tsuchida, T., Cottrell, G. (1-4 sierpnia 2012). *Auditory saliency using natural statistics*. 34th Annual Meeting of the Cognitive Science Society (s. 1048-1053), Sapporo, Japonia.
- Turk-Browne, N. B., Junge, J. A., Scholl, B. J. (2005). Attention and automaticity in visual statistical learning. *Journal of Vision*, 5(8), 1067-1067. <https://doi.org/10.1167/5.8.1067>
- Turk-Browne, N. B., Scholl, B. J., Chun, M. M., Johnson, M. K. (2009). Neural evidence of statistical learning: Efficient detection of visual regularities without awareness. *Journal of cognitive neuroscience*, 21(10), 1934-1945. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21131>
- Vangkilde, S., Coull, J. T., Bundesen, C. (2012). Great expectations: temporal expectation modulates perceptual processing speed. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 38(5), 1183-1191. <https://doi.org/10.1037/a0026343>
- Varghese, L., Bharadwaj, H. M., Shinn-Cunningham, B. G. (2015). Evidence against attentional state modulating scalp-recorded auditory brainstem steady-state responses. *Brain Research*, 1626, 146-164. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.06.038>
- Veldhuizen, M. G., Small, D. M. (2011). Modality-specific neural effects of selective attention to taste and odor. *Chemical senses*, 36(8), 747-760. <https://doi.org/10.1093/chemse/bjr043>

- Verleger, R. (1988). Event-related potentials and cognition: A critique of the context updating hypothesis and an alternative interpretation of P3. *Behavioral and brain sciences*, 11(3), 343-356. <https://doi.org/10.1017/S0140525X00058015>
- Wacongne, C., Labyt, E., van Wassenhove, V., Bekinschtein, T., Naccache, L., Dehaene, S. (2011). Evidence for a hierarchy of predictions and prediction errors in human cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(51), 20754-20759. <https://doi.org/10.1073/pnas.1117807108>
- Wagener, A., Hoffmann, J. (2010). Behavioural adaptations to redundant frequency distributions in time. W: A. C. Nobre, J. T. Coull, *Attention and time* (s. 217-226). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199563456.003.0016>
- Wearden, J. (2016). *The psychology of time perception*. Springer.
- Weinbach, N., Henik, A. (2012). Temporal orienting and alerting—the same or different? *Frontiers in psychology*, 3, artykuł 236. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00236>
- Weinberger, N. M. (2001). Receptive field plasticity and memory in the auditory cortex: coding the learned importance of events. W: J. Steinmetz, M. Gluck, P. Solomon (red.), *Model systems and the neurobiology of associative learning* (s. 187–216). Lawrence Erlbaum Associates.
- Weinstein, B. E., Ventry, I. M. (1982). Hearing impairment and social isolation in the elderly. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 25(4), 593-599. <https://doi.org/10.1044/jshr.2504.593>
- Whiteley, L., Sahani, M. (2012). Attention in a Bayesian framework. *Frontiers in human neuroscience*, 6, artykuł 100. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00100>
- Wickens, C. D. (2002). Multiple resources and performance prediction. *Theoretical issues in ergonomics science*, 3(2), 159-177. <https://doi.org/10.1080/14639220210123806>
- Wikman, P., Rinne, T., Petkov, C. I. (2019). Reward cues readily direct monkeys' auditory performance resulting in broad auditory cortex modulation and interaction with sites along cholinergic and dopaminergic pathways. *Scientific reports*, 9(1), 1-17. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38833-y>

- Winkler, I. (2007). Interpreting the mismatch negativity. *Journal of psychophysiology*, 21(3-4), 147. <https://doi.org/10.1027/0269-8803.21.3.147>
- Winkler, I., Czigler, I. (1998). Mismatch negativity: deviance detection or the maintenance of the 'standard'. *NeuroReport*, 9(17), 3809-3813. <https://doi.org/10.1097/00001756-199812010-00008>
- Winkler, I., Denham, S. L., Nelken, I. (2009). Modeling the auditory scene: predictive regularity representations and perceptual objects. *Trends in cognitive sciences*, 13(12), 532-540. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.09.003>
- Winkler, I., Karmos, G., Näätänen, R. (1996). Adaptive modeling of the unattended acoustic environment reflected in the mismatch negativity event-related potential. *Brain research*, 742(1-2), 239-252. [https://doi.org/10.1016/s0006-8993\(96\)01008-6](https://doi.org/10.1016/s0006-8993(96)01008-6)
- Winkler, I., Teder-Sälejärvi, W. A., Horváth, J., Näätänen, R., Sussman, E. (2003). Human auditory cortex tracks task-irrelevant sound sources. *Neuroreport*, 14(16), 2053-2056. <https://doi.org/10.1097/00001756-200311140-00009>
- Wixted, J. T., Serences, J. (2018). *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive Neuroscience, Sensation, Perception, and Attention (Vol. 2)*. John Wiley & Sons.
- Woldorff, M. G., Gallen, C. C., Hampson, S. A., Hillyard, S. A., Pantev, C., Sobel, D., Bloom, F. E. (1993). Modulation of early sensory processing in human auditory cortex during auditory selective attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(18), 8722-8726. <https://doi.org/10.1073/pnas.90.18.8722>
- Woldorff, M. G., Hackley, S. A., Hillyard, S. A. (1991). The effects of channel-selective attention on the mismatch negativity wave elicited by deviant tones. *Psychophysiology*, 28(1), 30-42. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.1991.tb03384.x>
- Wolfe, J. M. (1994). Guided search 2.0 a revised model of visual search. *Psychonomic bulletin & review*, 1(2), 202-238. <https://doi.org/10.3758/BF03200774>

- Wolfe, J. M. (2003). Moving towards solutions to some enduring controversies in visual search. *Trends in cognitive sciences*, 7(2), 70-76. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(02\)00024-4](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(02)00024-4)
- Wolfe, J. M., Gray, W. (2007). Guided search 4.0. *Integrated models of cognitive systems*, 99-119. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195189193.003.0008>
- Xu, Y., Chun, M. M. (2009). Selecting and perceiving multiple visual objects. *Trends in cognitive sciences*, 13(4), 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.01.008>
- Yin, P., Fritz, J. B., Shamma, S. A. (2014). Rapid spectrotemporal plasticity in primary auditory cortex during behavior. *Journal of Neuroscience*, 34(12), 4396-4408. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2799-13.2014>
- Yost, W. A. (1997). The cocktail party problem: Forty years later. *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*, 329-347. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Yost, W. A., Dye, R. H., Sheft, S. (1996). A simulated “cocktail party” with up to three sound sources. *Perception & psychophysics*, 58(7), 1026-1036. <https://doi.org/10.3758/BF03206830>
- Yu, A. J. (2014). Bayesian Models of Attention. W: S. Kastner, A. C. Nobre (red.), *The Oxford Handbook of Attention* (s. 1159-1197). Oxford University Press.
- Yu, A. J., Dayan, P. (2005a). Inference, attention, and decision in a Bayesian neural architecture. W: L. K. Saul, Y. Weiss, L. Bottou, *Advances in neural information processing systems* (s.1577-1584). MIT Press.
- Yu, A. J., Dayan, P. (2005b). Uncertainty, neuromodulation, and attention. *Neuron*, 46(4), 681-692. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2005.04.026>
- Zatorre, R. J., Mondor, T. A., Evans, A. C. (1999). Auditory attention to space and frequency activates similar cerebral systems. *Neuroimage*, 10(5), 544-554. <https://doi.org/10.1006/nimg.1999.0491>
- Zhao, J., Al-Aidroos, N., Turk-Browne, N. B. (2013). Attention is spontaneously biased toward regularities. *Psychological science*, 24(5), 667-677. <https://doi.org/10.1177/0956797612460407>

Zündorf, I. C., Karnath, H. O., Lewald, J. (2014). The effect of brain lesions on sound localization in complex acoustic environments. *Brain*, 137(5), 1410-1418. <https://doi.org/10.1093/brain/awu044>

Zündorf, I. C., Lewald, J., Karnath, H. O. (2013). Neural correlates of sound localization in complex acoustic environments. *PLoS One*, 8(5), artykuł e64259. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0064259>

## Aneks

Tabela 1

*G\*Power* – analiza a priori minimalnej liczebności próby w oparciu o parametry:  $\alpha$ ,  $(1-\beta)$  i wielkości efektu dla ANOVA z powtarzaniem pomiarem.

Dane wejściowe	Dane wyjściowe
Wielkość efektu: $f = 0,35$	Parametr niecentralności $\lambda = 16$
Prawdopodobieństwo błędu $\alpha = 0,05$	Krytyczna wartość $F = 2,81$
Moc $(1-\beta) = 0,90$	Df1 = 3
Liczba grup = 1	Df2 = 45
Liczba pomiarów = 4	Łączna liczebność próby = 16
Poprawka dla powtarzanych pomiarów = 0,5	Obserwowana moc = 0,91
Poprawka dla braku spełnionego założenia sferyczności $\epsilon = 1$	

*Źródło:* opracowanie własne.

Tabela 2

*Schemat organizacji warunków eksperymentalnych: zasada częstości.*

Osoba badana	Przestrzeń	Czas	Przestrzeń - Czas
1	1	500	2 750
2	1	750	3 1250
3	1	500	4 1250
4	1	750	3 500
5	1	750	4 1000

6	1	1000	2 1250
7	1	1000	4 500
8	1	1250	2 750
9	1	1250	3 1000
10	2	500	1 750
11	2	1000	3 750
12	2	500	4 1250
13	2	750	3 500
14	2	750	4 1000
15	2	1000	1 1250
16	2	1000	4 500
17	2	1250	1 750
18	2	1250	3 1000
19	3	500	1 750
20	3	500	2 1000
21	3	500	4 1250
22	3	750	2 500
23	3	750	4 1000
24	3	1000	1 1250
25	3	1000	4 500
26	3	1250	1 750
27	3	1250	2 1000
28	4	500	1 750
29	4	1250	2 500
30	4	500	3 1250
31	4	750	2 500
32	4	750	3 1000
33	4	1000	1 1250
34	4	1000	3 500
35	4	1250	1 750
36	4	1250	2 1000

*Źródło:* opracowanie własne.

Tabela 3

*Schemat organizacji warunków eksperymentalnych: zasada kolejności.*

Uczestnik	Lokalizacja	Czas	Lokalizacja – czas	
1	S1S2S3S4	T1T2T3T4	S1S2S4S3	T1T4T3T2
2	S1S2S3S4	T1T2T4T3	S1S2S4S3	T1T4T2T3
3	S1S2S3S4	T1T3T2T4	S1S2S4S3	T1T3T4T2
4	S1S2S3S4	T1T3T4T2	S1S2S4S3	T1T3T2T4
5	S1S2S3S4	T1T4T2T3	S1S2S4S3	T1T2T4T3
6	S1S2S3S4	T1T4T3T2	S1S2S4S3	T1T2T3T4
7	S1S2S4S3	T1T2T3T4	S1S3S2S4	T1T4T3T2
8	S1S2S4S3	T1T2T4T3	S1S3S2S4	T1T4T2T3
9	S1S2S4S3	T1T3T2T4	S1S3S2S4	T1T3T4T2
10	S1S2S4S3	T1T3T4T2	S1S3S2S4	T1T3T2T4
11	S1S2S4S3	T1T4T2T3	S1S3S2S4	T1T2T4T3
12	S1S2S4S3	T1T4T3T2	S1S3S2S4	T1T2T3T4
13	S1S3S2S4	T1T2T3T4	S1S3S4S2	T1T4T3T2
14	S1S3S2S4	T1T2T4T3	S1S3S4S2	T1T4T2T3
15	S1S3S2S4	T1T3T2T4	S1S3S4S2	T1T3T4T2
16	S1S3S2S4	T1T3T4T2	S1S3S4S2	T1T3T2T4
17	S1S3S2S4	T1T4T2T3	S1S3S4S2	T1T2T4T3
18	S1S3S2S4	T1T4T3T2	S1S3S4S2	T1T2T3T4
19	S1S3S4S2	T1T2T3T4	S1S4S2S3	T1T4T3T2
20	S1S3S4S2	T1T2T4T3	S1S4S2S3	T1T4T2T3
21	S1S3S4S2	T1T3T2T4	S1S4S2S3	T1T3T4T2



22	S1S3S4S2	T1T3T4T2	S1S4S2S3	T1T3T2T4
23	S1S3S4S2	T1T4T2T3	S1S4S2S3	T1T2T4T3
24	S1S3S4S2	T1T4T3T2	S1S4S2S3	T1T2T3T4
25	S1S4S2S3	T1T2T3T4	S1S4S3S2	T1T4T3T2
26	S1S4S2S3	T1T2T4T3	S1S4S3S2	T1T4T2T3
27	S1S4S2S3	T1T3T2T4	S1S4S3S2	T1T3T4T2
28	S1S4S2S3	T1T3T4T2	S1S4S3S2	T1T3T2T4
29	S1S4S2S3	T1T4T2T3	S1S4S3S2	T1T2T4T3
30	S1S4S2S3	T1T4T3T2	S1S4S3S2	T1T2T3T4
31	S1S4S3S2	T1T2T3T4	S1S2S3S4	T1T4T3T2
32	S1S4S3S2	T1T2T4T3	S1S2S3S4	T1T4T2T3
33	S1S4S3S2	T1T3T2T4	S1S2S3S4	T1T3T4T2
34	S1S4S3S2	T1T3T4T2	S1S2S3S4	T1T3T2T4
35	S1S4S3S2	T1T4T2T3	S1S2S3S4	T1T2T4T3
36	S1S4S3S2	T1T4T3T2	S1S2S3S4	T1T2T3T4