

# Amuzja Wyobrażeniowa

---

**Włodzisław Duch,  
Katedra Informatyki Stosowanej UMK, Toruń**

Google: W. Duch

## **Streszczenie:**

Agnozje wiążą się z niezdolnością do odczytania istotnych aspektów informacji z sygnałów płynących ze zmysłów, są więc trudnościami w przetwarzaniu informacji wstępującej (bottom-up) od zmysłów do obszarów skojarzeniowych. Wśród wielu typów agnozji wyróżnić można amuzję, związaną zwykle z niezdolnością do rozpoznawania wysokości dźwięku z powodu niewłaściwego przetwarzania informacji słuchowej przez mózg. Wyobrażanie sobie dźwięków wymaga aktywacji kory słuchowej przez obszary mózgu związane z pamięcią skojarzeniową. Zbyt słabe pobudzenia zstępujące mogą prowadzić do agnozji słuchowej związanej z wyobraźnią, pomimo poprawnego słuchu muzycznego. Taka forma agnozji, którą można nazwać amuzją wyobrażeniową, nie została jeszcze opisana. W tej pracy przedstawiony został zarys problemu z punktu widzenia neurofenomenologii: z jednej strony mechanizmy przetwarzania informacji słuchowej przez mózgi, oraz związki amuzji wyobrażeniowej z talentem muzycznym, a z drugiej subiektywna perspektywa wewnętrzna.

## **Wstęp: agnozje.**

Agnozja, czyli brak wiedzy (gr. *a-gnosis*), jest utratą zdolności do rozpoznawania tych informacji płynących ze zmysłów, które potrafi rozpoznać większość ludzi [1]. Może to dotyczyć praktycznie wszystkich cech subiektywnie postrzeganych: postrzegania ruchu (akinetopsja), koloru, kształtu lub też specyficznych kształtów, np. twarzy czy liter, połączenia wrażeń i słów (np. anomia koloru), identyfikacji obiektów za pomocą dotyku (astereognozja), integracji wrażeń z różnych zmysłów lub niezdolności do rozpoznania więcej niż jednego obiektu w polu widzenia (simultanagnozja). Niektóre agnozje dotyczą rzadkich specyficznych zaburzeń: np. allotopagnozja to ogólna niezdolność do wskazywania rzeczy, autotopagnozja to niezdolność do wskazywania własnych części ciała po otrzymaniu werbalnego polecenia, heterotopagnozja to niezdolność do wskazywania części ciała innych osób, a autoprosopagnozja to niezdolność do rozpoznawania własnej twarzy. Dotyczy to nie tylko wrażeń zmysłowych, ale i informacji o stanie emocjonalnym (alekstymia), która wymaga interpretacji i integracji wrażeń dotyczących stanu ciała i stanu jąder podkorowych.

Agnozje słuchowe podzielić można na 3 typy. Klasyczna agnozja akustyczna to zaburzenie rozpoznawania dźwięków niewerbalnych, odgłosów zwierząt lub sygnałów akustycznych. Bodźce akustyczne nie wystarczają wówczas do wskazania, który obrazek kojarzy się ze źródłem dźwięku. Może to być wynikiem niezdolności do odróżniania dźwięków (uszkodzenia pierwotnej kory słuchowej) jak i niezdolności do ich kojarzenia (uszkodzenia kory wtórnej). Agnozja słuchowa semantyczno-skojarzeniowa wiąże się z zaburzeniami słuchu fonematycznego, powodującymi trudności w rozróżnianiu wyrazów i co za tym idzie upośledzenia własnej mowy – brak jest rozumienia potrzeby korekcji, skoro się nie słyszy różnicy. Trzecim typem są agnozje muzyczne, główny temat tego artykułu.

Pojęcie „amuzja” odnosi się do wielu różnych zaburzeń, najczęściej niezdolności do rozróżniania wysokości dźwięków. Możliwa jest również niezdolność do określenia barwy instrumentu czy brak poczucia rytmu. W rzadkich przypadkach osoby cierpiące na amuzję słysząc muzykę mogą odczuwać nieprzyjemne wrażenia, przypominające piski i zgrzyty. Bateria testów MBEA (Montreal Battery of Evaluation of Amusia) używana jest do diagnostyki zaburzeń słuchu muzycznego [2]. Uważa się powszechnie, że wrodzoną amuzję ma około 4% populacji, ale ten procent zależy od przyjętych progów w stosowanych testach [3]. U natiwnych użytkowników języków tonalnych (chiński, tajski i inne) amuzja upośledza identyfikację tonów leksykalnych, jest więc skorelowana ze specyficzną formą agnozji [4]. Trening muzyczny poprawia też percepcję fonemów języków tonalnych, co wskazuje na wspólne mechanizmy neuronalne percepcji fonemów i muzyki. Wczesna specjalizacja kory słuchowej w rozróżnianiu fonemów prowadzi do trudności w uczeniu się języków obcych, np. języków tonalnych przez ludzi nie używających tonów w swoim języku. Zdolność do rozróżniania fonemów języków obcych zanika już około 10 miesiąca życia. Jest to przyczyną trudności uczenia się języków obcych w późniejszym wieku: jeśli się wyraźnie nie słyszy to nie można też nauczyć się rozumieć i poprawnie wymawiać słów w danym języku. Polakom trudności sprawia rozróżnienie np. angielskiego „thieve” i „sieve”, japończykom jednakowe wydaje się „ram” i „lam”. Można to uznać za specyficzne zaburzenia dyskryminacji fonemów.

Amuzja rytmu jest rzadka, ale okazuje się, że osoby potrafiące zsynchronizować swoje ruchy z metronomem mogą mieć trudności w wykryciu rytmu obecnego w muzyce [5]. Rehabilitacja wrodzonej amuzji nikomu się jeszcze nie udało, ale w przypadku amuzji nabytej trening kognitywny może przynieść dobre rezultaty [6]. Interpretacja emocjonalna wrażeń słuchowych jest silnie uwarunkowana kulturowo, np. siorbanie i siąkanie nieprzyjemne dla ludzi z Zachodu jest powszechnie akceptowane na Dalekim Wschodzie. Z europejskiego punktu widzenia można ich postawę uznać za rodzaj agnozji interpretacyjnej. Widać stąd, że niektóre formy agnozji należy również odnosić do średnich możliwości percepcji w danej kulturze.

Wszystkie formy agnozji należy odnosić do przeciętych możliwości. Osoby posiadające słuch absolutny mogą uznać pozostałe osoby za cierpiące na pewną formę agnozji, ale ponieważ słuch absolutny jest rzadki uznajemy takie osoby za szczególne uzdolnione. Osoby cierpiące na amuzję mają trudności w rozpoznawaniu dźwięków różniących się o niewielką liczbę półtonów (zwykle za próg diagnostyczny uznaje się 3 półtony).

## **Jak mózg reaguje na muzykę**

Strumień informacji płynący od wyższych obszarów w stronę kory analizującej dane zmysłowe potrzebny jest do powstania perceptu, zwłaszcza w sytuacji niejednoznacznej [7], [8]. Większość procesów przebiega w mózgu poza świadomością, umysł pełen jest spontanicznie pojawiających się myśli i wrażeń, w tym melodii, które zaczynamy niepodziewanie nucić, bo „przyszły nam do głowy”. Osoby kreatywne same tworzą nowe melodie, w których można dostrzec podstawowe struktury typowe dla danej kultury, połączone w nowy sposób. W wyjątkowych przypadkach predyspozycje genetyczne w połączeniu z wczesnym treningiem muzycznym przyczyniają się do ukształtowania „cudownych dzieci”. Wśród kompozytorów muzyki klasycznej na pewno był to Chopin, Mozart, Paganini, Bizet, Barber, Mendelsohn i Scriabin, ale chyba każdy gatunek muzyki ma swoich cudownych kompozytorów i wykonawców. W często cytowanym liście Mozarta wspomina on jak obraz całości komponowanego utworu rozwija się w jego umyśle podobnie do obrazu czy rzeźby (autentyczność tego listu bywa kwestionowana [9]). Jedną z charakterystycznych cech osób obdarzonych wyjątkowym talentem jest wyobraźnia muzyczna, zdolność do przypominania sobie usłyszanych utworów i tworzenia nowych kompozycji, które słyszane są „w głowie”. Oliver Sacks opisuje przypadki

spontanicznego przypominania sobie muzyki, stwarzające wrażenie jakby gdzieś grało głośne radio, którego nie można wyłączyć, nadające wkoło tą samą melodię [10] .

Wyobrażenie nowych melodii czy też wyrafinowanych kompozycji nie jest samo w sobie dziwniejsze niż wyobrażenie sobie smoka czy też skomplikowanej sceny we śnie. Żywa, szczegółowa wyobraźnia wzrokowa, słuchowa, czy też związana z innymi zmysłowymi modalnościami [11] wymaga pobudzenia odpowiednich obszarów kory zmysłowej by można było rozpoznać, co sobie dokładnie wyobrażamy. Pierwotna kora wzrokowa pełni rolę „neuronalnej siatkówki”, podobnie kora słuchowa może być uznana za obszar ekspresji zdarzeń dźwiękowych. Jest to oczywiście uproszczony obraz, bo żaden obszar mózgu nie działa w izolacji od innych. Przypominając sobie jakiś epizod próbujemy odtworzyć stan mózgu w czasie jego przeżywania, co pozwala na odczuwanie wrażeń (qualia) związanych z tym epizodem. W jakim stopniu pamięć epizodyczna odtwarza stan mózgu, który był w momencie przeżywania danego epizodu? W jakim stopniu poszczególne składowe przeżywanego epizodu są dobrze odtwarzane i jakie są indywidualne różnice związane z wyobrażeniami dla różnych modalności zmysłowych? Niestety nie znamy odpowiedzi na takie pytania, wymaga to rozwinięcia neurofenomenologii [12] , a to nie jest łatwe zadanie [13]

W przypadku wzroku zarówno widzenia jak i wyobrażanie sobie danej sceny pokazuje w obrazowaniu za pomocą funkcjonalnego rezonansu magnetycznego zaangażowanie podobnych struktur w obszarach czołowo-ciemieniowym jak i skroniowo-potylicznym [15] . Analiza ruchów gałek ocznych w czasie przypominania sobie wcześniej oglądanej sceny z zamkniętymi oczami i porównanie ruchów sakadycznych w czasie oglądania danej sceny pokazuje tendencje do pamiętania nie tylko rozpoznanych elementów obrazu, ale i sekwencji ich oglądania. „Oko umysłu” porusza się podobnie jak rzeczywiste oko. Można to badać zarówno za pomocą metod elektrofizjologicznych, neuroobrazowania jak i testami behawioralnymi, oceniając szczegóły przypominanych epizodów.

W przypadku wzroku mamy przesuwanie się uwagi pomiędzy różnymi obszarami przestrzeni, co zamienia struktury przestrzenne na sekwencję pobudzeń w czasie, pozwalając na rozpoznawanie kolejnych obiektów. Dla słuchu mamy również do czynienia z sekwencją pobudzeń pierwotnej kory słuchowej i przyległych do niej obszarów, inicjowaną przez czołowo-ciemieniowe obszary kory skojarzeniowej. Są tu duże różnice indywidualne, wynikające prawdopodobnie z gęstości połączeń zstępujących i wstępujących pomiędzy obszarami kory zmysłowej w obszarze potyliczno-skroniowym i obszarami kory skojarzeniowej w obszarach czołowych i ciemieniowych. Chociaż połączenia biegną w obydwie strony nie są symetryczne. Kora oczodołowa-czołowa ma rozległe połączenia z korą skojarzeniową i korą zmysłową, w tym słuchową, a objętość pierwotnej kory słuchowej jest odwrotnie skorelowana z objętością przedniej kory przedczołowej. Autorzy pracy [16] konkludują, że „istnieją obustronne powiązania pomiędzy procesami poznawczymi wysokiego poziomu (high-order cognition) i niskopoziomowymi wrażeniami (low-level sensation)”.

Przetwarzanie informacji może ulec zaburzeniu na różnym etapie. Wyobraźnia wzrokowa, słuchowa, czy też związana z innymi zmysłami wymaga pobudzenia odpowiedniej kory zmysłowej by można było rozpoznać, co sobie wyobrażamy i odtworzyć qualia związane z danym epizodem. Nie każdy to potrafi i dlatego jest sens mówić o agnozji wyobrazeniowej, związanej z strumieniem informacji zstępującej. Te pobudzenia muszą być dostatecznie silne i powinny trwać nie krócej niż kilka oscylacji gamma (a więc 100 ms lub dłużej), by inne części mózgu mogły je odróżnić od szumu, przypadkowych wyładowań neuronów. Niestety nie mamy szczegółowych informacji o gęstości połączeń wstępujących i zstępujących. Metody traktografii oparte na analizie tensora dyfuzji pokazują jedynie anatomiczne połączenia nie wyróżniając ich kierunku [17] Kluczowa rola modulacji projekcji zstępujących w postrzeganiu wysokości dźwięku jest niewątpliwa; w modelu przedstawionym w pracy [18] połączenia

zstępujące wpływając na rekurencyjne połączenia hamujące aktywność grup neuronów regulują wielkość okienka czasowego, w którym następuje integracja informacji, dostosowując przepływ informacji do istotnych zmian w różnych momentach czasu. Chociaż ten model pomija wiele neurobiologicznie istotnych faktów dzięki uwzględnieniu sprzężeń zwrotnych potrafi np. odtworzyć silniejsze reakcje na rzadkie i krótkie bodźce na tle reakcji na wysokość dźwięku w czasie ciągłej stymulacji (sustained pitch response), obserwowane w bocznej części zakrętu Heschla, łącznie z latencją reakcji tego obszaru na pojawienie się bodźca.

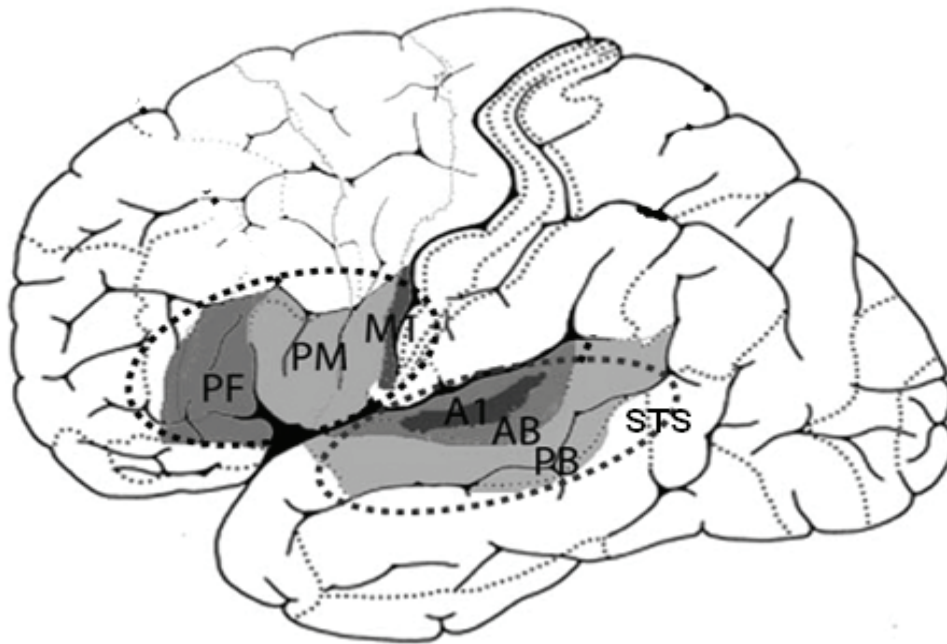
Postrzeganie wysokości dźwięków jest konieczne do zarówno prawidłowego odbioru melodii jak i elementów prozodycznych. Postrzegana wysokość dźwięku jest perceptem, wynikiem reakcji kory słuchowej i oceną tej reakcji przez obszary skojarzeniowe. Zwykle jest ona związana z tonem podstawowym danej fali dźwiękowej, ale w niskich tonach może się nieco zmienić w zależności od głośności, a wysokość złożonych dźwięków może być trudno określić. Intensywność dźwięku, jego barwę i lokalizację przestrzenną analizują jądra pnia mózgu i wzgórze w czasie nie przekraczającym 10 ms.

Kora słuchowa – pola BA 41, 42 i 52, czyli pierwotna kora A1, pas słuchowy AB oraz kora okołowyspowa (parainsular cortex) schowana w bruzdzie bocznej, niewidoczna na Rys. 1 – pozwala na bardziej subtelną ekstrakcję cech typu wysokości (*pitch*), zabarwienia wysokości (*pitch chroma*), określenia pełnej chromy dźwięku (składają się na nią parametry określające obwiednie intensywności składowych dźwięku w przestrzeni częstotliwości), postrzeganej głośności i lokalizacji. Określenie wysokości dźwięku umożliwia rozdzielenie różnych strumieni informacji, podczas gdy określenie zabarwienia jego wysokości rozróżnienie sekwencji nut składających się na melodię. Zakręt skroniowy przedni poprzeczny (zakręty Heschla) należy do pierwotnej kory słuchowej i zmiany chromatyczne wpływają również na aktywność bieguna skroniowego, a zmiany wysokości na aktywność równiny skroniowej, schowanej w bruzdzie bocznej. Razem z korą przedruchową oraz polami Brodmanna 44 i 45 (PM i PF, boczno-brzuszną korą przedczołową na Rys. 1) okolice górnego zakrętu skroniowego biorą udział w kodowaniu pamięci sensorycznej związanej ze słuchem.

W tylnej części rozszerzonego pasa słuchowego (pola BA22p, lub tylna część PB, obszar Broca PM na Rys. 1), zawierającym obszar Wernickego, zachodzi grupowanie rytmiczne i melodyczne, określające gestalt dźwięku. Przednia i tylna część rozszerzonego pasa bierze udział w analizie akordów, interwałów czasowych i struktur melodycznych (świadczą o tym zmiany w potencjałach wywołanych EEG, pojawiające się w ciągu 100-200 ms). W płacie czołowym, w obszarze Broca i korze przedruchowej dochodzi do analizy harmonii, brzmienia, taktu i rytmu. Środkowy zakręt skroniowy (poniżej STS) oraz zakręt wrzecionowaty to obszary trzeciorzędowe, pozwalające na nadawanie znaczenia słyszanym dźwiękom, łączeniu z wrażeniami wzrokowymi oraz nazwami wskazującymi na określone obiekty (np. instrumenty muzyczne).

W końcowym etapie informacja słuchowa rozchodzi się prawie po całym mózgu, umożliwiając percepcję wielomodalną oraz wspomagając podejmowanie różnych decyzji, dlatego mówi się o rozszerzonych lub rozporoszonych obszarach kory reagujących na bodźce słuchowe [19], [20]. Rola kory słuchowej to ekstrakcja cech z korowo-wzgórzowo-pniowych pętli dostarczających informacje o zdarzeniach w środowisku i przesyłanie ich dalej do szczegółowych analiz samego dźwięku, struktur melodycznych, harmonii, oraz równoległe do wielomodalnych obszarów skojarzeniowych, podkorowych struktur analizujących emocje i obszarów decyzyjnych. Jest to sieć funkcjonalnych połączeń interpretujących i udostępniających rezultaty z słuchowych perceptów wszystkim podsięciom używanym przez mózg do działania i planowania działań w oparciu o symulacje (wyobrażenia) stanu świata (środowiska i własnego organizmu). Aktywacje związane z percepcją naturalnych fragmentów muzyki obejmują obszary kory czołowej, przedczołowej i ciemieniowej, a także mózdzek, ale pozwalają na roz-

różnienie strumieni informacji związanych z percepcją rytmu, melodii i barwy dźwięku [21], [22]. Badania te sugerują istnienie opisujących muzykę składowych, które nie zostały jeszcze wyraźnie wyodrębnione.



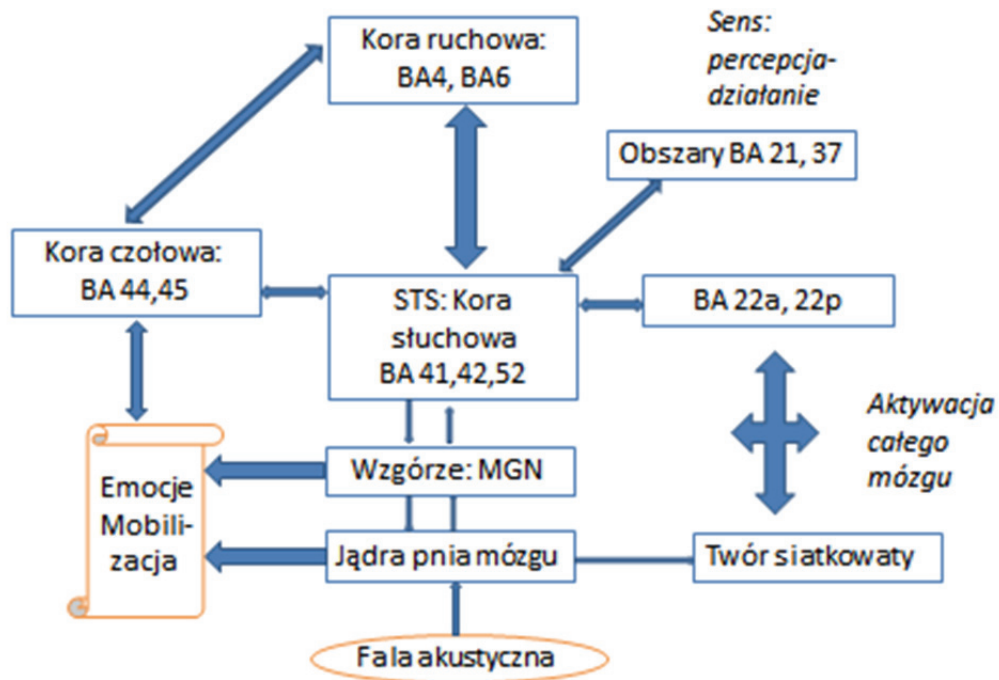
**Rys. 1. Obszary mózgu związane z przetwarzaniem bodźców akustycznych w płacie skroniowym i czołowym. Pierwotna kora słuchowa (A1), pas słuchowy (AB), pas rozszerzony (PB, obszar Wernickiego), boczno-brzuszna kora przedczołowa (PF) i przedruchowa (PM, Broca), kora ruchowa (M1).**

Taka organizacja przetwarzania informacji istnieje nie tylko u ludzi ale i kotów oraz innych zwierząt [19]. Jednak tylko ludzie potrafią nazywać stany swojego umysłu, nadając im reprezentację symboliczną, która jest swojego rodzaju etykietą rozmytej kategorii aktywacji wielu obszarów mózgu. Słowa, podobnie jak inne pojęcia przydatne w procesach poznawczych (twarze, obiekty), reprezentowane są w anatomicznie rozproszonych pętlach łączących obszary zmysłowe i ruchowe (action-perception circuits [23] [24], [25]). Ułatwia to specjalizacja jednej z półkul (najczęściej lewej) w analizie fonologicznej mowy, pozostawiając analizę pozostałych bodźców słuchowych (np. wysokości i chromy) głównie przeciwległej półkuli [26], chociaż jest to zawsze pewne nakrywanie się funkcji, a nie ostry podział.

Funkcjonalne połączenia między wymienionymi wyżej obszarami przedstawione są na Rys. 2. Jądra znajdujące się w pniu mózgu dostarczają bezpośrednio informacji do ciała migdałowatego i tworzą siatkowatego pnia mózgu, skracając czas potrzebny do mobilizacji organizmu w przypadku wykrycia dźwięków świadczących o niebezpieczeństwie. Uszkodzenia połączeń między poszczególnymi obszarami, lub wyłączenie któregoś z tych obszarów (np. z powodu udaru, wylewu, guzów czy uszkodzeń mechanicznych) powodują specyficzne agnozje. W szczególności uszkodzenia obszarów pierwotnej kory słuchowej powodują utratę wrażeń słuchowych, chociaż zachowane są różne odruchy związane z bodźcami akustycznymi analizowanymi przez jądra pnia mózgu i wzgórza.

Szczegółowa analiza neuroanatomii funkcjonalnej wykracza oczywiście poza cel tej pracy. Szkic przepływu informacji jest przydatny by uświadomić sobie, że analiza poszczególnych aspektów bodźców akustycznych może być upośledzona na różnych etapach, powodując zaburzenia zdolności rozróżniania niewielkich interwałów muzycznych, instrumentów, brak

poczucia rytmu, pamięci do melodii lub niezdolność do przeżywania emocji wywołanych muzyką. Przegląd szczegółowych informacji na ten temat znaleźć można w pracach [1] [20] [27] [28]. Prace te nie uwzględniają jednak rozróżnienia pomiędzy percepcją zewnętrzną, inicjowaną przez bodźce akustyczne i szlaki wstępujące, a percepcją wewnętrzną inicjowaną przez wyobraźnię muzyczną. Nie ma w nich też prób zrozumienia, jak zaburzenia przepływu informacji w mózgu wpłyną na subiektywne przeżycia danej osoby.



Rys. 2. Główne obszary zaangażowane w przetwarzanie bodźców akustycznych. MGM – ciało kolankowate przyśrodkowe, STS – zakręt skroniowy górny; pola Brodmanna opisane w tekście.

Do jakiego stopnia przypominanie sobie melodii wywołuje takie same aktywacje w mózgu jak ich słyszenie? Na ile pamięć lub wyobraźnia odtwarza stany mózgu przypominające rzeczywisty epizod? Chociaż nie mamy pełnej odpowiedzi na to pytanie na podstawie licznych badań z użyciem neuroobrazowania i pacjentów z różnymi uszkodzeniami mózgu wielu autorów [29] [30] [31] uzasadnia, że przypominanie sobie i wyobraźnia muzyczna opera się na współpracy tych samych obszarów mózgu jak naturalna percepcja. Agnozje związane z percepcją muzyki wiążą się również z brakiem wyobraźni tych samych aspektów, które nie są postrzegane. Przypominanie sobie melodii, powtarzanie w pamięci oraz dopełnianie fragmentów melodii zastąpionych ciszą związane jest z aktywacją pierwotnej kory słuchowej i struktur leżących w rozszerzonym pasie słuchowym. Słuchając znany utwór muzyczny z którego usunięto fragmenty zastępują je cisza neuroobrazowanie fMRI pokazało [32] aktywację w górnej części zakrętu skroniowego (STS), przy czym obszar aktywny był większy wtedy, gdy była to muzyka czysto instrumentalna, zachodząc na pierwotną korę słuchową (PAC). Interpretacja takich eksperymentów zakłada, że rekonstrukcja brakującej informacji w przypadku melodii ze słowami możliwa jest dzięki aktywacjom rozproszonych obszarów kory odpowiedzialnych za semantykę, zaś przy braku słów aktywność rozszerza się do pierwotnej kory

sluchowej, odtwarzając informację potrzebną do identyfikacji danego fragmentu muzycznego. Subiektywnie te obie sytuacje powinny różnić się między sobą intensywnością odczuwania melodii, ale niestety w tego typu badaniach aspekty subiektywne są pomijane. Powstanie świadomych wrażeń (w odróżnieniu od identyfikacji dźwięków lub utworów muzycznych) zarówno pod wpływem informacji zewnętrznej jak i wewnętrznej wymaga zaangażowania pierwotnej i wtórnej kory zmysłowej. Kora ruchowa jest również aktywna, szczególnie u muzyków, wskazując na rolę wyobraźni ruchowej i bezgłośnie wokalizacji.

W jaki sposób kora słuchowa aktywowana jest wewnętrznie? Prawdopodobnie [20] obszary pamięci skojarzeniowej w korze czołowej aktywują za pomocą połączeń zstępujących lokalne obwody w korze słuchowej, inicjując wyobrażenia muzyczne. Słabsze sygnały ze wzgórza i jąder w pniu mózgu pozwalają nam odróżnić rzeczywiste dźwięki, chociaż ten mechanizm może ulec zaburzeniu, jak to udokumentował Oliver Sacks [10] (por. też odnośniki do halucynacji muzycznych w [20] [30]). Aktywacja boczno-brzuszných części kory czołowej jest widoczna w wielu zdaniach związanych z pamięcią epizodyczną, a więc pamięć i wyobrażenia muzyczna opiera się prawdopodobnie na ogólnym mechanizmie działania pamięci epizodycznej i planowania, w które zaangażowane są płaty przedczołowe. Niestety brakuje informacji o względnej sile połączeń zstępujących i wstępujących. Nie wiemy więc, czy aktywacja wewnętrzna kory słuchowej następuje w sposób bezpośredni, czy też w kolejności odwrotnej do rozchodzenia się aktywacji wywołanej bodźcami zewnętrznymi. Nie mamy na razie komputerowego modelu ilustrującego w jaki sposób funkcjonalne obszary pojawiają się w mózgu spontanicznie w rezultacie plastyczności neuronów (procesów uczenia się) w wyniku słuchania muzyki. Model taki istnieje dla języka [25] [33], wyjaśniając i przewidując powstawanie leksykalnych reprezentacji składających się z silnie sprzężonych, anatomicznie rozróżnialnych pętli korowych w kilku obszarach mózgu, pozwalając na niezależną aktywację kilku pojęć jednocześnie. Symulacje komputerowe pozwalają zrozumieć dlaczego i gdzie takie reprezentacje powstają, przewidując sposób rozchodzenia się aktywacji w dużych rozproszonych obszarach mózgu, pozwalając na zrozumienie rezultatów obserwacji i otwierając drogę do badań nad neurofizjologią pojęć i pamięci.

## **Agnozja wyobrazeniowa**

Zdolność do wyobrażania sobie dźwięku jest bardzo zróżnicowana, od przypadków, w których nie można się uwolnić od melodii granej przez „mentalne radio”, opisywanych przez Sacksa [10], do przypadków całkowitej ciszy, braku możliwości wyobrażenia sobie wrażeń dźwiękowych. Takie skrajne przypadki amuzji wyobrazeniowej są dość rzadkie i zapewne zróżnicowane pod względem aspektów muzycznych dotyczących wysokości, barwy, rytmu czy całej melodii. Powstanie świadomego wrażenia wymaga współpracy wielu obszarów mózgu, od kory zmysłowej po ośrodki decyzyjne w płatach przedczołowych. Wyobrażenia aktywuje wyższe obszary, ale jeśli aktywność neuronalna tych obszarów nie pobudzi kory zmysłowej i nie utworzy się zsynchronizowany stan rezonansowy pomiędzy tymi obszarami doświadczenie subiektywne nie będzie miało tego samego charakteru co rzeczywiste przeżycie. Informacja odgórna (top-down), płynąca w stronę kory zmysłowej, nie zawsze wystarczająco silnie ją pobudzi. W efekcie w mózgu może zachodzić wiele procesów, np. wyobrażonych melodii, których sobie nie uświadamiamy. Niewielu ludzi ma wrażenia słuchowe we śnie [13] chociaż słyszenie głosów w stanie hipnagogicznym, na granicy snu i jawy, jest dość częste.

Badaniem różnych odmian agnozji zajmuje się neuropsychologia. Większość z nich nie jest na tyle szkodliwa by traktować je jako poważne upośledzenia. Klasyczna amuzja jest stosunkowo rzadka, cierpi na nią tylko kilka procent populacji. Znacznie większe różnice można zaobserwować w reakcjach emocjonalnych na muzykę [34], mocy jaką ma nad nami muzyka,

jak określa to Elena Mannes [35]. Nie każda osoba obdarzona dobrym słuchem muzycznym jest miłośnikiem muzyki. Nie wiemy na ile jest to wpływ czynników środowiskowych, a na ile predyspozycji genetycznych, związanych z przepływem informacji wewnątrz mózgu, gęstością połączeń pomiędzy różnymi strukturami. Subiektywne oceny są skorelowane z obiektywnymi pomiarami pobudzenia emocjonalnego, emocjonalne pobudzenie jest konieczne by odczuwać przyjemność ze słuchania muzyki [34]. Podział na cechy wrodzone i nabyte jest dość płynny. Wszystkie funkcje mózgu są uwarunkowane neurologicznie, na ich rozwój mają wpływ zarówno geny, środowisko prenatalne, stymulacje po narodzeniu jak i specyficzna forma muzyki, którą uczymy się rozpoznawać w pierwszych latach życia. Podstawowe funkcje, takie jak rozpoznawanie wysokości dźwięku czy wycucie rytmu, są widoczne u niemowląt, ale ich dalszy rozwój wymaga stymulacji. Europejczycy rzadko potrafią docenić indyjskie ragi czy birmański styl muzyczny *hsaing waing*, który robi na nich wrażenie kakofonii. Taki mechanizm ewolucyjny pozwala każdej kulturze rozwinąć odmienne formy muzyczne.

Agnozje pojawiają się w wyniku niewłaściwego przetwarzania informacji wstępującej. Może to być związane bezpośrednio ze szlakiem wstępującym, lub też ze zbyt słabym pobudzeniem zwrotnym, przez co nie może się uformować odpowiednie sprzężenie pomiędzy niższymi i wyższymi obszarami w mózgu. Jest tu całe spektrum możliwości, od obniżonej sprawności konkretnych funkcji percepcyjnych, przechodzących w skrajnym przypadku w specyficzne agnozje, do trudności w pobudzeniu niższych obszarów w czasie przypominania sobie epizodu lub wyobrażania nowej sytuacji. Agnozje klasyczne powinny więc mieć swoje odpowiedniki w agnozach związanych z wyobraźnią i dokładnością przypominanych szczegółów dotyczących wrażeń zmysłowych. Badanie agnozji wyobrażeniowych powinno pomóc zrozumieć relację pomiędzy połączeniami wstępującymi z zstępującymi. Takie podejście można nazwać neurofenomenologiczny [12]: fenomenologiczne ujęcie, czyli perspektywa wewnętrzna, oraz możliwości zewnętrznego opisu stanu mózgu, wzajemnie się warunkują. Systematyczna analiza subiektywnie postrzeganych stanów mentalnych nie da się w pełni zredukować do czysto obiektywnego opisu aktywacji mózgu. Może jednak pomóc w postawieniu szeregu hipotez dotyczących sposobu przepływu informacji pomiędzy różnymi obszarami mózgu.

Spontaniczna wyobraźnia muzyczna (involuntary music imagery, INMI), objawiająca się przypominaniem melodii, nuceniem lub podśpiewywaniem, jest bardzo częsta. Czasami przyjmuje to postać uporczywie nawracających stanów od których nie można się uwolnić, przypominających natręctwo (w języku angielskim funkcjonują terminy „*earworm*” i „*cognitive itch*”). Nie ma na razie badań wyjaśniających przyczyny takich stanów, można tu jedynie snuć spekulacje i analogie do natręctw i obsesji. W przypadku trudności z odróżnieniem słyszanej wewnętrznie muzyki od dochodzącej z zewnątrz mówimy o halucynacjach słuchowych.

Liikkanen [30] przeprowadził badania ankietowe INMI na większej grupie (ok. 12.000 osób) i ocenia, że około 33% osób ma takie doświadczenia codziennie, a ponad 90% ankietowanych przynajmniej raz w tygodniu. W 76% były to piosenki, a więc tekst i muzyka, a w 26% muzyka instrumentalna lub własne improwizacje melodyczne. Jedynie 0.2% osób stwierdziło, że nigdy nie doznaje w spontaniczny sposób muzyki. W tym badaniu nie określono jednak, do jakiego stopnia jest to żywe wyobrażenie, obejmujące melodię i rytm odczuwaną w porównywalny sposób ze słyszeniem. Brakuje testów intensywności wyobraźni muzycznej, porównywalnych z testami wyobraźni wzrokowej [36]. Z moich własnych pobieżnych obserwacji (głosowanie większych grup studentów) wynika, że są tu duże różnice. Kilka procent pytanych osób nie odczuwa wewnętrznie inicjowanych wrażeń słuchowych, pomimo poprawnej pamięci muzycznej pozwalającej im nucić melodię. Możliwa jest więc aktywacja obszarów kory ruchowej bez na tyle silnej aktywacji kory słuchowej by wywołać wrażenie dźwięku.



Wydaje się, że jest tu wyraźna dysocjacja pomiędzy różnymi strumieniami przepływu informacji, gdyż osoby, które nie mają wrażeń dźwiękowych obejmujących wysokość dźwięku i melodię mogą odczuwać sam rytm, mają też wrażenie słyszenia wewnętrznej mowy. Może się to wiązać z lateralizacją mowy i różnym stopniem treningu, jakiemu poddawane są połączenia w lewej i prawej półkuli. Istotne też może być większe zaangażowanie płatów czołowych w analizę rytmu i procesy związane z mową.

Jeśli stan mózgu w momencie czasu  $t$  dla epizodu  $E$  opisać jako wektor  $S(E,t)$  zawierający wyniki pomiaru aktywności różnych obszarów mózgu, a przywołany stan mózgu w czasie przypominania lub wyobrażania sobie oznaczyć przez  $S(M,t')$  to interesują nas różnice aktywności tych stanów  $S(E,t) - S(M,t')$  dla czasu  $t'$  w którym subiektywne wyobrażone doświadczenie jest najbardziej zbliżone do przeżytego pierwowzoru. W przypadku wyobraźni wzrokowej jest opracowano test behawioralny Vividness of Visual Imagery Questionnaire (VVIQ) [33] [11] oceniający zdolność do odtworzenia w wyobraźni widzianego obrazu; pomimo swoich niedoskonałości wyniki tego testu korelują się ze stopniem aktywności pierwotnej kory wzrokowej (V1) pokazując, że „żywa wyobraźnia” wzrokowa wymaga aktywacji niższych pięter kory wzrokowej. Niestety nie ma takich testów dla innych modalności zmysłowych. Nawet w przypadku wyobraźni wzrokowej brakuje badań statystycznych pokazujących jaki proces populacji to osoby o żywej wyobraźni, a jaki procent jej nie ma; często powołuje się tu na pracę Galtona [37] z 1880 roku! Faw [38] przeanalizował literaturę dotyczącą braku wyobraźni i stwierdził, że temat ten jest ignorowany, a wielu psychologów po prostu zaprzecza istnieniu osób pozbawionych zmysłowej wyobraźni. Z jego własnych badań wynika, że 2-5% osób nie ma wcale, lub ma znikomą wyobraźnię wzrokową. Prawdopodobnie w przypadku wyobraźni słuchowej jest podobnie.

Zaprzeczanie istnienia osób pozbawionych zmysłowej wyobraźni jest dziwne bo wszystkie funkcje mózgu wykazują duże różnice indywidualne. Intensywność i szczegółowość wyobrażeń dla różnych modalności zmysłowych powinna korelować się z siłą pobudzeń zstępujących, czyli wpływem pamięci na aktywność kory zmysłowej. Na jednym końcu tego ekstremum są ludzie, którzy mają tak silną wyobraźnię, że miesza się to im z rzeczywistością i zaburza normalne działanie, a na drugim osoby, które nie widzą, nie słyszą ani nie czują przywołanych wspomnień chociaż wiedzą, co sobie przypominają. Z pobieżnych obserwacji wynika, że procentowo może ich być tyle samo, ale to skrajne odchylenia od przeciętnej, opisywanej prawdopodobnie rozkładem Gaussa. Znaczący procent ludzi nie przypomina sobie szczegółów widzianych sytuacji jeśli nie wie, o co będzie pytana, a strategia niektórych osób polega na werbalnym zapamiętywaniu nazwanych cech, np. koloru czy wzoru ubrania. Jednak ta informacja może być zakodowana w mózgu i prawidłowo rozpoznana (co wymaga porównania postrzeganego i zapamiętanego bodźca), chociaż może być trudno ją sobie uświadomić (co wymaga aktywacji kory zmysłowej). Możliwa jest też sytuacja, w której tylko informacje o określonej modalności zmysłowej lub określone cechy są zapamiętywane, np. można nie pamiętać kolorów i mieć trudności z rozpoznaniem jakiego koloru był widziany przedmiot, a pamiętać kształt lub melodię.

Temat agnozji wyobrażeniowych to cały dział neuropsychologii czekający na odkrycie. Osoby mające taką przypadłość będą wykazywały różne symptomy typowe dla agnozji przy wykonywaniu zadań „z pamięci”. Dotyczy to w szczególności słuchowej agnozji wyobrażeniowej, niezdolności do wyobrażenia sobie konkretnych dźwięków, brzmienia i wysokości dźwięku (choć mogą to być sprawy rozłączne). Niektóre przypadki mogą być podobne do skojarzeniowej agnozji słuchowej, ale brak dostatecznie silnych pobudzeń zstępujących powinien dać się odróżnić od problemów skojarzeniowych. Ludzie z żywą wyobraźnią słuchową mają podobne słuchowe potencjały wywołane dla brakujących dźwięków znanych melodii jak w sytuacji, gdy słyszą wszystkie dźwięki, dopełniając sobie brakujące dźwięki dzięki wy-

obraźni [32] , [39] . Jest więc prawdopodobnym, że osoby z amuzją wyobrazeniową nie będą wykazywały takich reakcji, a wyniki ERP będą się korelować z subiektywnie ocenianą żywością wyobraźni dźwiękowej, jak to się dzieje w przypadku wyobraźni wzrokowej [36] .

## **Perspektywa wewnętrzna: eksperyment**

Ujawnienie procesów przypominania wymaga wykonania działań, które można zauważyć. Skoro w przypadku agnozji wyobrazeniowej nie można ich zauważyć wewnętrznie trzeba to zrobić przez działania zewnętrzne, np. podśpiewując lub grając jakąś melodię. To doświadczenie jest podobne do ślepowidzenia [40] ,[41] : osoby niewidzące mogą się nauczyć reagować prawidłowo na dochodzące do mózgu informacje omijając przeszkody, ale nie mają wrażeń wzrokowych ze względu na uszkodzenie kory wzrokowej. Próba grania na instrumencie osoby z wyobrazeniową agnozą słuchową przypomina chodzenie po pomieszczeniu bez wrażeń wzrokowych, ale intuicyjne wybierająca właściwą drogę. Nie wiadomo, co usłyszy po uderzeniu danego klawisza, bo chociaż dźwięki są rozpoznawane (rozpoznawane są błędy w melodii) nie można sobie przypomnieć, jak będą brzmiały.

To jest właśnie mój przypadek. Wiem, że nie mogę po zamknięciu oczu wywołać z pamięci żadnego obrazu (za wyjątkiem powidoków), ani też przywołać melodii. Dlatego przez ostatnich 5 lat prowadziłem eksperyment w celu sprawdzenia, czy systematyczny trening muzyczny nie doprowadzi do pojawienia się wrażeń związanych z wyobrażeniami melodii.

Nauczyłem się grać z nut jak i improwizować na instrumencie dętym (EWI, Electronic Wind Instrument) i fletach różnego rodzaju. Gram zarówno utwory klasyczne jak i wszelkie inne gatunki muzyki. Wymaga to wyczucia, jakie podejmować działania ruchowe pomimo niezdolności do świadomego wyobrażenia sobie konsekwencji tych działań. W tej sytuacji czuję się jak słuchacz, zaskakując siebie tym, co gram, bez świadomego wpływu na wynik. Mogę śpiewać unisono, ale nie solo, nie potrafię zaśpiewać prostej melodii po paru sekundach od jej usłyszenia, chociaż nie mam żadnych trudności z jej rozpoznaniem lub zauważeniem sfałszowanej nuty.

Niestety uczenie się melodii na pamięć jest dla mnie bardzo trudne, brakuje mi korelacji pomiędzy określonym działaniem ruchowym a wyobrażeniem dźwięku, którego powinienem się spodziewać. Uczenie się grania nowego utworu związane jest z pamięcią utajoną, wymaga wielokrotnych powtórzeń i jest bardzo powolne. Nawet po latach grania tego samego utworu nie ma szans na zagranie go na innym instrumencie (EWI pozwala zmieniać syntetyczne instrumenty ale palcowanie pozostaje to samo). Grając muszę polegać na zapisie nutowym. Jednocześnie potrafię improwizować unikając ewidentnych błędów, dorabiać i kończyć frazy w interesujący sposób. Moja ukryta przed świadomym przeżywaniem wyobraźnia muzyczna działa całkiem dobrze, kreatywność jest możliwa pomimo braku wyobrażenia dźwięków. Niestety granie w zespole jest w zasadzie niemożliwe bez wyobrażenia sobie dźwięku, jaki należy wydać by się dopasować do innych instrumentów.

Po prawie 5 latach nie zauważyłem żadnej zmiany, nadal nie jestem w stanie wyobrazić sobie brzmienia ani wysokości dźwięków. Mam jedynie słabe wrażenie pulsowania rytmu, interwałów pozbawionych wysokości i barwy. Dorastałem w domu, w którym dziadek grał na skrzypcach a rodzice śpiewali, więc nie była to kwestia braku muzycznej stymulacji w dzieciństwie. Próba uczenia mnie gry na pianinie zakończyła się niepowodzeniem, chociaż słuch miałem dobry i lubiłem bawić się dźwiękami.

Odczuwając potrzebę grania na instrumencie mogę się dowiedzieć, jakie procesy zachodzą w moim mózgu. Takie postępowanie nie jest wcale takie rzadkie i wiąże się z enaktywnym podejściem do percepcji: uczymy się rozumieć swoje wrażenia aktywnie eksplorując świat. Nie

ogranicza się to tylko do wczesnego okresu rozwoju. By się dowiedzieć, co się dzieje w naszej głowie musimy to uzewnętrznić, powiedzieć lub zaśpiewać. Zdarzają się przypadki ludzi głośno do siebie mówiących, często ludzie czytają na głos by lepiej zrozumieć. Niektóre działania mogą mieć tylko taki sens, by spowolnić napływ nowych informacji, lub dać więcej czasu na skojarzenia, potrzebne do interpretacji. Zrozumienie tych procesów będzie miało daleko idące konsekwencje, w szczególności w zrozumieniu procesów uczenia i edukacji.

## Konsekwencje

Opisane tu rozważania rodzą wiele pytań. Na ile talent zależy od żywej wyobraźni? Jak to zależy od modalności (wzrok, słuch, smak, dotyk)? Być może jest taka korelacja w przypadku muzyki, sztuki czy architektury. Zdolność do rysowania z pamięci powinna korelować się z wyobraźnią wzrokową. Czy możliwa jest (i czy warto) próbować wpłynąć na dzieci z agnozą wyobraźniową? Czy jest to wrodzona przypadłość, czy może intensywny trening muzyczny we wczesnym dzieciństwie może to zmienić? Czy i jak często zdarzają się przypadki braku wyobraźni w pojedynczej modalności, czy też raczej są wszystkich na raz? Jakie procesy w mózgu przechodzą niezauważone i wymagają uzewnętrznienia by się o nich dowiedzieć? Czy należy traktować dzieci z agnozą wyobraźniową na lekcjach muzyki czy plastyki ulgowo podobnie jak dzieci z dysleksją? Czy jest korelacja pomiędzy emocjonalnymi aspektami muzyki a zmysłową wyobraźnią?

Nie potrafię odpowiedzieć na te pytania znając dokładnie tylko jeden przypadek (swój) i nie wiedząc jak bardzo jest on nietypowy. Agnoza wyobraźniowa może być pozytywną cechą, oszczędzając energię potrzebną do powstawania skojarzeń na poziomie abstrakcyjnym, np. myślenia o algorytmach czy fizyce teoretycznej. Spodziewam się więc wśród matematyków (zwłaszcza algebraików) czy fizyków teoretycznych (zwłaszcza fizyków matematycznych) sporego procentu osób z agnozą wyobraźniową. Grupa muzykologów nie powinna zawierać takich przypadków. Kontrast pomiędzy tymi grupami w pomiarach słuchowych potencjałów wywołanych powinien być wyraźny. Zrozumienie indywidualnych różnic dotyczących wyobraźni może być istotne z punktu widzenia predyspozycji do różnych zawodów, mogą być też istotne różnice pomiędzy kobietami i mężczyznami. Jeśli okaże się np. że więcej mężczyzn niż kobiet ma agnozę wyobraźniową będzie to ważna informacja dla zrozumienia różnic uzdolnień wykraczających poza sferę emocjonalną.

Czym jest talent? Zdolności lub talent oznaczają łatwość osiągnięcia wysokiego poziomu kompetencji w jakiejś dziedzinie. Talent zależy od rozwoju i współpracy specyficznych obszarów mózgu, dlatego może dotyczyć wybranych dziedzin i nie jest tożsamy z ogólną inteligencją [42]. Widać to szczególne w przypadku sawantów, u których obsesyjne skupienie i powtarzanie tych samych czynności w jednej, wąskiej dziedzinie, w której mogą funkcjonować w miarę normalnie pozwalają im na osiągnięcie nadzwyczajnych możliwości [43]. Jest to okupione upośledzeniami w innych dziedzinach, do czego przyczynia się prawdopodobnie zbytne skupienie na czynnościach jednego typu. Jest więc prawdopodobne, że deficyt w zakresie wyobraźni muzycznej może mieć jakieś pozytywne strony, pozwalając się skupić na działaniach, które przychodzą z większą łatwością. Mózgi, które nie tracą energii na pobudzanie kory zmysłowej powinny mieć więcej energii na procesy skojarzeniowe.

Agnozie wyobraźniowej mogą się więc wiązać z brakiem talentu w zakresie muzyki czy sztuki, ale ułatwiają skupianie się nad abstrakcyjnymi zadaniami, typowymi dla większości gałęzi nauk ścisłych. Do rozwoju talentu artystycznego potrzebna jest silna motywacja, kombinacja zachowań celowych i sprawności mechanizmów percepcji, które można trenować, jeśli jest szansa na ich rozwój [42]. W przypadku amuzji wyobraźniowej po 5 latach systematycznych prób nie udało mi się uzyskać zauważalnego postępu.

Niewiele jest publikacji na temat neurobiologicznych podstaw talentu. Neuronauki kognitywne odkryły różne korelacje pomiędzy inteligencją, mierzoną za pomocą testów IQ, a różnymi aspektami budowy mózgu, takimi jak szybkość przewodzenia impulsów nerwowych, gęstość połączeń synaptycznych, sprawność pamięci roboczej [42]. Do ujawnienia się wyjątkowego talentu nie wystarczy jednak wysoki iloraz inteligencji. Uzdolniona osoba może zbyt szybko się rozproszyć jeśli nie sformułuje jasno określonych celów, nie stanie przed wyzwaniem, które zachęca ją do skupienia się na rozwoju swoich umiejętności. Kora przedczołowa, odpowiedzialna za pamięć roboczą, pozwala również na planowanie, ale do wytrwałości w realizacji planów potrzebna jest siła woli. Znane są niektóre czynniki, konieczne do utrzymania siły woli, takie jak dostateczny poziom glukozy we krwi [44], kontrolę kory przedruchowej przez korę grzbietowo-czołowo-przyśrodkową [45] [46], ale brakuje pełnego modelu wyjaśniającego procesy samokontroli. Trudno jest badać obecnymi technikami eksperymentalnymi takie procesy jak wytrwałość, bada się więc procesy decyzyjne i ich związek z oceną wartości i nagrody. Nie wyjaśnia to jednak natury talentu. Amuzja i inne agnozje wyobrażeniowe mogą być ciekawym kierunkiem badań rzucającym nowe światło na psychologię różnic indywidualnych, a w szczególności na zagadnienia związane z talentem. Jest tu jeszcze wiele do odkrycia.

### Literatura:

- [1] Farah M.J, Visual agnosia. Disorders of object recognition and what they tell us about normal vision. Cambridge: MIT Press, 1990.
- [2] Peretz, I., Champod, S. & Hyde, K, Varieties of Musical Disorders: The Montreal Battery of Evaluation of Amusia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, 58-75, 2003.
- [3] Henry M.J, J.D. McAuley, On the Prevalence of Congenital Amusia. *Music Perception: An Interdisciplinary Journal* 27(5), 413-418, 2010
- [4] Nan Y, Y. Sun, I. Peretz, Congenital amusia in speakers of a tone language: association with lexical tone agnosia. *Brain* 133; 2635–2642, 2010.
- [5] Phillips-Silver J, Toiviainen P, Gosselin N, Piché O, Nozaradan S, Palmer C, Peretz I, Born to dance but beat deaf: a new form of congenital amusia. *Neuropsychologia*; 49(5), 961-969, 2011.
- [6] Weill-Chounlamountry A, Soyeux-Gayout L, Tessier C, Pradat-Diehl P, Cognitive rehabilitation of amusia. *Ann Readapt Med Phys*. 51(5), 332-341, 2008.
- [7] Ullman, S. (1996). High-level vision: Object recognition and visual cognition. Cambridge, MA: MIT Press
- [8] Dehaene, S, Changeux J.P, Naccache L, Sackur J, Sergent C. (2006). Conscious, pre-conscious, and subliminal processing: A testable taxonomy. *Trends in Cognitive Science* 10(5):204–211.
- [9] Kivy P, Mozart and Monotheism: An Essay in Spurious Aesthetics. *The Journal of Musicology* 2(3), 1983, 322-328
- [10] Sacks O, Muzykofilia. Opowieści o muzyce i mózgu. Zysk i Ska, 2009.
- [11] Marks, D.F. (1995). New directions for mental imagery research. *Journal of Mental Imagery*, 19, 153-167
- [12] Varela F, Neurofenomenologia: metodologiczne lekarstwo na trudny problem. *Avant* 1, 210, 31-75
- [13] Schwitzgebel E, Perplexities of consciousness. MIT Press 2011
- [14] Duch W, Neurodynamics and the mind. Proc. of the International Joint Conference on Neural Networks, San Jose, CA, IEEE Press, pp. 3227-3234, 2011.

- [15] Slotnick, S. D., Thompson, W. L., and Kosslyn, S. M. 2012. Visual memory and visual mental imagery recruit common control and sensory regions of the brain. *Cognitive Neuroscience*, 3 (1), 14–20.
- [16] Song C, D.S. Schwarzkopf, R. Kanai, G. Rees, Reciprocal Anatomical Relationship between Primary Sensory and Prefrontal Cortices in the Human Brain. *The Journal of Neuroscience* 31(26):9472-9480, 2011.
- [17] Hagmann P, Cammoun L, Gigandet X, Meuli R, Honey CJ, et al. Mapping the Structural Core of Human Cerebral Cortex. *PLoS Biol* 6(7): e159, 2008. doi:10.1371/journal.pbio.0060159
- [18] Balaguer-Ballester E., Clark, N., Coath, M., Krumholz, K, Denham, S. L. Understanding Pitch Perception as a Hierarchical Generative Process with Top-Down Modulation. *PLoS Computational Biology*, 5(3): e1000301, 2009. doi:10.1371/journal.pcbi.1000301.
- [19] Winer JA, Lee CC. The distributed auditory cortex. *Hearing Research* 229(1-2):3-13, 2007
- [20] Zatorre R.J, There's more to auditory cortex than meets the ear. *Hearing Research* 229, 24–30, 2007.
- [21] Stewart, L, Von Kriegstein, K, Warren, D.J, Griffiths, D.T. (2006). Music and the brain: disorders of musical listening. *Brain*, 129, 2533-2553.
- [22] Alluri, V., Toiviainen, P., Jääskeläinen, I., Glerean, E., Sams, M., & Brattico, E. (2011). Large-scale brain networks emerge from dynamic processing of musical timbre, key and rhythm. *NeuroImage* 59, 3677–3689, 2012.
- [23] Lamb S.: *Pathways of the Brain: The Neurocognitive Basis of Language*. Amsterdam & Philadelphia: J. Benjamins Publishing Co. (1999)
- [24] Pulvermüller F.: *The Neuroscience of Language. On Brain Circuits of Words and Serial Order*. Cambridge, UK: Cambridge University Press (2003)
- [25] Garagnani M, Pulvermüller F (2011) “From sounds to words: a neurocomputational model of adaptation, inhibition and memory processes in auditory change detection.” *Neuroimage* 54(1):170-81
- [26] Zatorre E.J, Neural specializations for tonal processing. *Annals of the New York Academy of Sciences* 930:193-210, 2001.
- [27] Koelsch S (2011) Toward a neural basis of music perception – a review and updated model. *Front. Psychology* 2:110. doi: 10.3389/fpsyg.2011.00110
- [28] Peretz I, Zatorre R.J. Brain organization for music processing. *Annual Review of Psychology* 56:89–114, 2005.
- [29] Halpern, A.R., Zatorre, R.J., Bouffard, M. & Johnson, J.A. (2004) Behavioral and neural correlates of perceived and imagined timbre. *Neuropsychologia*, 42, 1281-1292
- [30] Liikkanen, L.A. Music in everymind: commonality of involuntary musical imagery. *Proceedings of the 10th International Conference of Music Perception and Cognition*. Sapporo, Japan, 408–412, 2008
- [31] Halpern A.R, Cerebral Substrates of Musical Imagery. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 930: 179–192, 2001
- [32] Kraemer, D.J.M., C. N. Macrae, A.E. Green, W.M. Kelley. “Musical Imagery: Sound of Silence Activates Auditory Cortex : *Nature* 434, 158, 2005.
- [33] Garagnani M, Wennekers T, Pulvermüller F (2009), “Recruitment and consolidation of cell assemblies for words by way of Hebbian learning and competition in a multi-layer neural network.” *Cognitive Computation* 1(2):160-176
- [34] Salimpoor, V.N., Benovoy, M., Longo, G., Cooperstock, J.R. & Zatorre, R.J. (2009) The Rewarding Aspects of Music Listening Are Related to Degree of Emotional Arousal. *PLoS One*, 4, e7487

- [35] Mannes E, The power of music. *Pioneering Discoveries in the New Science of Song*. Walker & Company, 2011.
- [36] Cui, X., Jeter, C.B, Yang, D, Montague, P.R, Eagleman, D.M. (2007). Vividness of mental imagery: Individual variability can be measured objectively. *Vision Research*, 47, 474-478
- [37] Galton, F. (1880). Statistics of Mental Imagery. *Mind* (5) 301-318.
- [38] Faw B, Conflicting Intuitions May Be Based On Differing Abilities. *Journal of Consciousness Studies*, 16(4), 45–68, 2009.
- [39] Janata, P. (2001). Brain electrical activity evoked by mental formation of auditory expectations and images, *Brain Topography*, 13(3): 169-193
- [40] Weiskrantz, L. (1986). *Blindsight: A Case Study and Implications*. Oxford University Press
- [41] Metzinger, T. (Ed.) (2000). *The Neural Correlates of Consciousness*. Cambridge, MA: MIT Press.
- [42] Kalbfleisch, M.L, Functional neural anatomy of talent. *The Anatomical Record Part B: The New Anatomist* 277, 21–36, 2004
- [43] Fehr T, J. Weber, K. Willmes, M. Herrmann, Neural correlates in exceptional mental arithmetics. About the neural architecture of prodigious skills, *Neuropsychologia*, 48(5), 1407-1416, 2010.
- [44] Baumeister, R. F., & Tierney, J. (2011). *Willpower: Rediscovering the greatest human strength*. New York: Penguin Press.
- [45] Kühn S, Haggard P, Brass M. (2009). Intentional inhibition: How the "veto-area" exerts control. *Hum Brain Mapp.* 30(9):2834-2843.
- [46] Hare, T.A, Camerer, C.F, Rangel, A. Self-Control in Decision-Making Involves Modulation of the vmPFC Valuation System. *Science* 324 (5927): 646–8, 2009.