

Mózgi i Edukacja: W Stronę Fenomiki Neurokognitywnej

Włodzisław Duch, wduch@is.umk.pl

Katedra Informatyki Stosowanej, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, oraz Wydział Humanistyczny, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń

Abstrakt

Fenomika zajmuje się szczegółowym opisem wszystkich aspektów mierzalnych cech organizmu, od fizycznych cech na poziomie genetycznym, molekularnym komórkowym, do cech opisujących zdolności poznawcze. *Fenomika neuropsychiatryczna* to nowa dziedzina badająca choroby psychiczne na wszystkich poziomach. Nauki o uczeniu się muszą pójść podobną drogą, próbować zrozumieć procesy poznawcze z perspektywy rozwoju mózgu, zarówno w aspekcie czasowym (od poczęcia do wieku starości), przestrzennym (od genów do całego mózgu) jak i społecznym (rola edukacji i kultury w kształtowaniu mózgu). W tym celu konieczne jest stworzenie nowej gałęzi nauki, fenomiki neurokognitywnej. Mózg traktowany jest jako substrat, kształtowany przez czynniki genetyczne, epigenetyczne, biologiczne oddziaływanie środowiska, substrat w którym zachodzą procesy uczenia się wynikające z indywidualnych doświadczeń życiowych, kontaktów społecznych, kultury i edukacji. Przedstawiony został krótki przegląd różnych aspektów związanych z fenomiką neurokognitywną na 7 poziomach, od genetyki do stylów uczenia się. Zaproponowano nowe spojrzenie na style uczenia się, powiązanie z zachodzącymi w mózgu procesami.

Słowa kluczowe

Nauki o uczeniu się, edukacja, pedagogika kognitywna, neuroedukacja, mózg, fenomika, genotyp, fenotyp, pamięć, uczenie się, style uczenia się.

WSTĘP

Wszelkie przeżycia, których doznajemy, muszą pobudzić mózg, inaczej nie moglibyśmy ich doznawać. Każde pobudzenie zostawiające stabilny ślad w pamięci, który może się uaktywnić wpływając na zachodzące w mózgu procesy, można uznać za formę uczenia się. Mózg można postrzegać jako substrat, w którym powstają umysły dzięki procesom w niezwykle złożonej sieci neuronów, komórkach glejowych, procesom na poziomie genetycznym i epigenetycznym. Procesy te zachowują delikatną równowagę pomiędzy stabilnością i plastycznością, zachowaniem tego co już wiemy i nie chcemy tej wiedzy popsuć, oraz tego co warto się nauczyć i wymaga to od mózgu zmiany. Pełne zrozumienie procesów uczenia się wymaga opisu zmian zachodzących w mózgu na wielu poziomach: na poziomie molekularnym (genetyka, białka budujące neurony, neurochemia wpływająca na ich aktywność), na poziomie neuroanatomicznym i elektrofizjologicznym (zmiana siły połączeń i aktywacji neuronów), zmiany zachowania na poziomie opisu procesów kognitywnych (pamięć, emocje, cele, intencje).

Fenomika to gałąź nauki, zajmująca się identyfikacją i opisem fenotypów, czyli mierzalnych cech organizmów. Mogą to być cechy fizyczne, na poziomie genetycz-

nym i molekularnym, ogólne cechy organizmu, czy też cechy osobowości. W ostatnich latach nastąpił ogromny postęp w fenomice na poziomie molekularnym. Przez analogię do *genomu* i *proteomu*, czyli zbiorów wszystkich genów i wszystkich białek organizmu, *fenom* jest nazwą zbioru wszystkich fenotypów komórek, tkanek, organów, organizmów danego gatunku, opisanych za pomocą mierzalnych wielkości. W ramach Projektu Ludzkiego Fenomu (*Human Phenome Project*, Freimer & Sabatti 2003) zbierana jest wszelka informacja o ludzkich fenotypach, w nadziei, że pozwoli to wyjaśnić własności organizmów i liczne aspekty ludzkich zachowań. Oczywiście wszelka kwantyfikacja procesów ciągłych, włączanie ich w schematy i szablony, jest zawsze tylko przybliżeniem, ale bez takiej próby nie da się niczego ustalić. Każdy organizm i każda choroba jest na bardzo szczegółowym poziomie czymś unikalnym, ale podobieństwa są dostatecznie duże by umożliwić diagnozę i leczenie.

W 2008 roku w USA powołano konsorcjum fenomiki neuropsychiatrycznej (*Consortium for Neuropsychiatric Phenomics*, <http://www.phenomix.ucla.edu>), którego zadaniem jest zbadać biologiczne mechanizmy leżące u podstaw fenotypów ludzi cierpiących na schizofrenię, chorobę dwubiegunową, zespół nadpobudliwości psychoruchowej z deficytem uwagi (ADHD). 300 osób w każdej z tych grup badanych jest w kompleksowy sposób, analizowane są ich genomy, neuroanatomia, funkcje behawioralne. Wyniki te porównywane są z danymi zebranymi dla 2000 zdrowych ludzi, stanowiących odpowiednio dobraną, zróżnicowaną grupę kontrolną. Pozwoli to zrozumieć jak wiążą się fenotypy na poziomie genetycznym i molekularnym z fenotypami behawioralnymi, z którymi ma do czynienia psychiatria. To pierwszy ważny krok w kierunku pełnego zrozumienia chorób psychicznych. Zrozumienie procesów zachodzących w mózgu, integracja informacji na temat genetyki, epigenetyki, wpływu środowiska na powstawanie ścieżek sygnałowych, budowę komórek, tkanek, neuronów i ich sieci, powstawanie fenotypów procesów kognitywnych, przejawiających się w specyficznych reakcjach, zaburzeniach psychoorganicznych i chorobach psychicznych to ogromne wyzwanie, ale nie ma tu alternatywy.

W krajach anglosaskich 20 lat temu wyodrębniła się interdyscyplinarna dziedzina związana z procesami uczenia się, określana jako „nauki o uczeniu się” (*learning sciences*). Główny wkład do jej powstania mają nauki kognitywne, psychologia wychowania, informatyka, antropologia, lingwistyka stosowana. Nauki o mózgu pojawiają się tu na razie w niewielkim stopniu, ale jest dość oczywiste, że do zrozumienia procesów uczenia się i tworzenia lepszych środowisk pozwalających na rozwój intelektualny na wszystkich etapach życia konieczne będzie zrozumienie fenotypów na wielu poziomach. Jest to jeszcze trudniejsze niż w przypadku fenomiki neuropsychiatrycznej, gdyż procesy uczenia się są bardziej złożone, a celem powinno być pełne rozwinięcie możliwości rozwoju człowieka, a nie tylko zrozumienie poważnych zaburzeń tego rozwoju. Taką dziedzinę można nazwać fenomiką neurokognitywną, by podkreślić centralną rolę procesów neuronalnych. Nie podjęto jeszcze żadnych inicjatyw w tym kierunku, ale podobnie jak w przypadku psychiatrii, jeśli celem jest zrozumienie wszystkich aspektów związanych z uczeniem się i poszukiwanie optymalnych sposobów wspomagania tych procesów na każdym etapie życia, nie ma innej alternatywy.

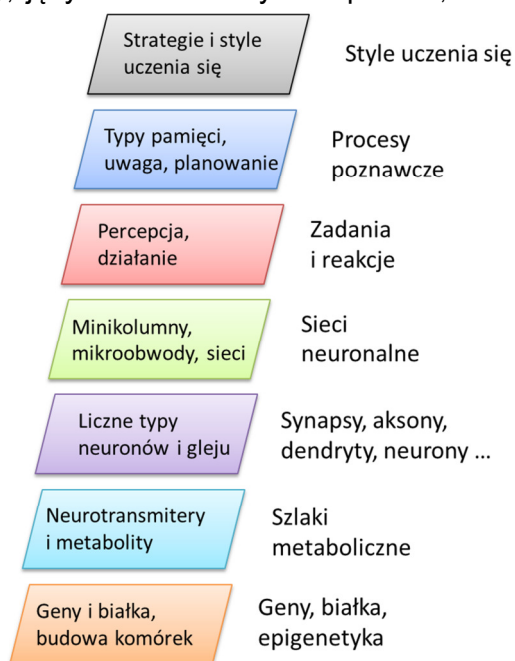
W tym artykule naszkicowane zostały na 7 poziomach procesy ważne z punktu widzenia fenomiki neurokognitywnej. Na końcu przedstawiona została interpretacja stylów uczenia się Kolba (1984) w powiązaniu z procesami zachodzącymi w mózgu. Ilustruje to możliwości połączenia klasycznych teorii psychologicznych z podejściem neurokognitywnym.

OD GENÓW DO STYLÓW UCZENIA SIĘ

Podział procesów biologicznych i psychologicznych na poziomy jest rzeczą umowną i wynika z próby dopasowania istniejących gałęzi nauki do opisu złożonych zjawisk. Rysunek 1 przedstawia 7 takich poziomów ułożonych hierarchicznie, od najbardziej podstawowych na poziomie genetyki i procesów molekularnych do poziomu opisu

zachowania i uczenia się. Przechodzimy więc od fizyki i chemii, biologii i neurobiologii, do psychologii i pedagogiki. Poziomy leżące wyżej w hierarchii nie dają się zwykle w pełni zredukować do poziomów bardziej podstawowych. Pojawiają się własności emergentne, które nie mają sensu na niższym poziomie, np. budowa trąby słonia jest nie tylko wynikiem genetyki i procesów rozwojowych, ale odbiciem ekosystemu, ewolucji gatunku, zmian klimatycznych które do tej ewolucji doprowadziły. Budowa i działanie mózgu nie wyjaśnią nam w pełni ludzkich zachowań bez uwzględnienia indywidualnej historii, kultury, języka i wielu innych aspektów, które stoją poza biologią. Na skuteczność uczenia się można wpływać zwiększając neuroplastyczność mózgu, ale też musi się ona wiązać z oceną poziomu wiedzy, jaką dany mózg dysponuje, i możliwościami zapamiętania i interpretacji pojęć, które do niego docierają.

Informacja przepływa zarówno w górę jak i w dół poziomów tej hierarchii, zmieniając w pewnym stopniu fenotypy na każdym poziomie. Psychiatria interesuje się zaburzeniami tego procesu wykraczającymi poza uznawaną normę, a nauki o uczeniu się poszukują optymalnych sposobów rozwoju uwzględniającego efekty genetyki, odżywiania, środowiska, doświadczeń życiowych, wpływ kontaktów społecznych i formalnej edukacji na rozwój umysłu, inteligencję i cechy charakteru.



Geny i Białka

Instrukcja pozwalająca skonstruować nowe komórki organizmu zapisana jest w DNA, ale do jej odczytania potrzebny jest skomplikowany mechanizm uruchamiający kolejne etapy tej budowy. Połowa masy wysuszonej komórki to białka powstałe z zapisu informacji genetycznej. Znanych jest ponad 16 milionów sekwencji aminokwasów białek. W banku danych o białkach (Protein Data Bank, PDB) zgromadzono ponad 85 tysięcy opisów całych strukturach przestrzennych różnych białek. Białka konstruują neurony i inne komórki powstając w środowisku, które musi dostarczyć odpowiednich składników w dostatecznej ilości. Poważne zaburzenia rozwojowe (IQ poniżej 70) dotyka 1-3% ogólnej populacji i wiąże się z mutacjami kilku tysięcy różnych genów kontrolujących rozwój mózgu.

Odczytywanie informacji z DNA kontrolowane jest przez środowisko za pomocą licznych mechanizmów określanych jako epigenetyczne, zmieniających sposób odczytu informacji zawartej w genach (czyli zmieniających „ekspresję genów”) przy niezmienionej sekwencji DNA. Odkryto wiele mechanizmów kontroli ekspresji genów, np. metylację DNA (przyczepianie się grup cząsteczek CH₃ do łańcucha DNA). Takie procesy mogą całkowicie zatrzymać produkcję określanego białka, a tym samym przyczynić się do powstania źle funkcjonujących komórek. Istnieje towarzystwo naukowe *DNA Methylation Society* wydające czasopismo na temat epigenetyki, opisujące różne efekty związane z wpływem odżywiania, chorobami, jak i medycznymi, behawioralnymi i psychologicznymi efektami związanymi z epigenetyką. Takie zmiany zachodzące w komórce mogą być dziedziczone przez wiele pokoleń komórek i są przyczyną powstawania nowotworów.

Układ nerwowy kształtuje się w okresie prenatalnym. Wiele cech jest dziedzicznych i wpływa na strukturę całego organizmu. Już w łonie matki daje się zauważyć podstawowe cechy temperamentu (Pesonen i in. 2008). Długość ciąży ma istotny wpływ na rozwój zdolności poznawczych jak i rozwój różnych chorób dziesiątki lat

później. Efekty epigenetyczne są szczególnie ważne w okresie płodowym, wpływa na nie sposób odżywiania, witaminy, leki, alkohol i inne używki, procesy zapalne, bakterie i wirusy, oddziaływanie różnych patogenów obecnych w środowisku na organizm matki. Wiele problemów metabolicznych, chorób krwi i organów wewnętrznych, jak i problemów neurologicznych ma tutaj swoją przyczynę. W Europie badania nad efektami epigenetycznymi zainicjowano na większą skalę w 2003 roku w ramach Projektu Ludzkiego Epigenomu (*Human Epigenome Project*). Na razie badane są poważne zaburzenia związane z rakiem i innymi chorobami, ale wskazuje się też na implikacje tych badań dotyczące rozwoju dzieci, zaburzeń neurologicznych i chorób psychicznych oraz procesów starzenia. Procesy epigenetyczne są jeszcze bardziej zróżnicowane niż genetyczne bo zachodzą w inny sposób w różnych tkankach. Ponieważ łatwiej i bezpieczniej będzie na nie wpływać niż manipulować genomem wiąże się z nimi duże nadzieje. Chwilowo celem jest eliminacja zaburzeń rozwojowych, ale na dłuższą metę będzie to zapewnienie optymalnych warunków rozwoju dla budowy mózgu i całego organizmu.

Szlaki sygnałowe

Liczba genów nie decyduje o złożoności organizmu. Ludzie mają nie więcej niż 23 tysiące genów, a to zaledwie jedna czwarta genów pszenicy. Istotna jest złożoność oddziaływań pomiędzy białkami, ścieżek reakcji zachodzących w komórkach, czyli wielkość *interaktomu*. U ludzi jest to sieć około 650 tysięcy oddziaływań, wielokrotnie więcej niż u prostszych organizmów (Stumpf i in. 2008). Białka oddziałują z innymi organizmami tworząc funkcjonalne kompleksy i sieci oddziaływań spełniające określone funkcje w komórce, szlaki metaboliczne transportu różnych substancji do struktur komórkowych. Liczne szlaki metaboliczne są uniwersalne, znajdują się zarówno u bakterii jak i w komórkach ludzkich. Komórka wymienia produkty metaboliczne z zewnętrznym środowiskiem przez kanały w jej membranie i pory, komunikując się z otoczeniem i reagując na zachodzące w nim procesy. Komórki komunikują się ze sobą za pomocą takich substancji jako hormony i czynniki wzrostu, pobudzające struktury membran (receptory) inicjujące procesy wymiany substancji między wnętrzem komórki i środowiskiem zewnętrznym.

Komórki macierzyste przekształcają się w różnego typu neurony i komórki gleju migrując do odpowiednich miejsc w zależności od stężenia licznych czynników, takich jak czynniki wzrostu nerwów (BDNF), relina – białko regulujące procesy umiejscowienia neuronów i stymulujące rozwój dendrytów, tretynoina (metabolit witaminy A), płyn mózgowo-rdzeniowy, jak i obecność naczyń krwionośnych. Istnieje wiele specyficznych szlaków związanych z neurogenezą i migracją neuronów. W dorosłych mózgach ssaków neurogeneza wydaje się być ograniczona do okolic hipokampa i opuszki węchowej, dzięki czemu mózg może się nieznacznie rozwijać jednocześnie pracując stabilnie, bez większych zakłóceń wprowadzanych przez reorganizację sieci neuronalnej z powodu nowych neuronów.

Zanim wiedza o powstawaniu mózgu przyda się do terapii procesów neurodegeneracyjnych trzeba będzie odpowiedzieć na podstawowe pytania. Mamy obecnie bardzo wiele różnych dziedzin nauki kończących się na „-mika”, inspirowanych sukcesami genomiki (długi spis jest pod adresem omics.org). Nie wszystkie mają polskie nazwy. Organizm ekspozowany na niektóre czynniki może wykazać zmiany chorobowe – badania nad takimi czynnikami nazwano *ekspozomiką*, a zbiór takich czynników *ekspozomem*. Wpływ pożywienia na procesy rozwojowe nazwano *nutri-nomics* albo *foodomics*, co będzie trudno zgrabnie nazwać po polsku (pokarnomika?). Uwaga skupia się na badaniach, które mają znaczenie medyczne, a możliwości wspomaganie procesów rozwojowych tak, by lepiej przygotować organizm do kolejnych wyzwań przed nim stojących są na razie pomijane. Lepsze zrozumienie wpływu i monitorowanie czynników związanych ze środowiskiem i pokarmem na szlaki metaboliczne i procesy rozwojowe na pewno może się przyczynić nie tylko do zmniejszenia częstości zaburzeń procesów rozwojowych wymagających późniejszej

interwencji ze strony pedagogiki specjalnej, lecz również do optymalizacji procesów rozwoju mózgu w pierwszym roku życia, analizy sygnałów płynących ze zmysłów i sprawnej kontroli ciała.

Neurony

Mózg nie przypomina uniwersalnego komputera, jego funkcje można lepiej porównać do zbioru wielu kooperujących ze sobą wyspecjalizowanych agentów, reagujących na nadchodzące informacje w automatyczny i stereotypowy sposób. Całość potrafi się dostosować do nowych sytuacji realizując złożone zadania. Komórki mózgu – neurony, astrocyty i inne komórki gleju – należą do najdłużej żyjących komórek i różnią się znacznie od pozostałych komórek organizmu. Neurony mają bardzo zróżnicowaną budowę, wielkość, długość aksonu i wielkość drzewa dendrytów, gęstość i wielkość kolców dendrytycznych, na których są synapsy, rodzajów synaps i receptorów na membranie. Bardzo długie aksony widoczne jako biała materia potrzebne są do sterowania mięśniami i odbierania bodźców z odległych części ciała, łączenia przeciwległych obszarów obu półkul, jak i obszarów z przodu głowy (przedczołowych i czołowych) ze skroniowymi, ciemieniowymi i potylicznymi. Jest to konieczne do prawidłowego rozwiązywania złożonych zadań, wymagających koordynacji obszarów rozproszonych po całym mózgu. Krótkie aksony interneuronów pozwalają na tworzenie lokalnych mikroobwodów hamujących zbyt silną aktywność neuronów, które mogą się wzajemnie pobudzić w pętli dodatniego sprzężenia (podobnie jak sprzęga się mikrofon ustawiony zbyt blisko głośnika), niszcząc dochodzącą do nich informację lub wywołując napady padaczkowe. W każdym z około 1000 dających się odróżnić z punktu widzenia budowy komórkowej obszarów szarej materii można znaleźć około 10 typów różnych neuronów, w mózgu może więc ich być nawet 10 tysięcy. Ostatnie oszacowania liczby neuronów w mózgu człowieka to 86 ± 8 mld, z czego 16 ± 2 mld w korze mózgu, około 2 mld w jądrach podkorowych, rdzeniu kręgowym i innych częściach ciała i aż 69 ± 7 mld w mózdzku (Lent i in. 2012). Widać, jak ważne jest uczenie się sterowania ruchami i ich precyzyjne wykonywanie, w czym specjalizuje się mózdzek. Percepcja, pamięć, skojarzenia i procesy poznawcze służą przede wszystkim planowaniu i wykonywaniu ruchów, będących odpowiedzią organizmu na postrzegane bodźce.

Neurony mogą nie funkcjonować poprawnie z bardzo wielu powodów: cały mózg może się źle zbudować, kora może się źle pofałdować (myszy mają gładką korę, my mocno pomarszczoną, dzięki czemu jej powierzchnia jest znacznie większa), mutacje genetyczne i czynniki środowiskowe mogą spowodować niewłaściwe związanie się łańcuchów aminokwasów białek w struktury przestrzenne (od tego zależy ich prawidłowa funkcja i budowa organelli komórek, synaps, dendrytów). Czynniki wzrostu neuronów kontrolują powstawanie i migrację neuronów a następnie ich zaprogramowaną śmierć (apoptozę), gdyż nie wszystkie trafiają w odpowiednie miejsca rozwijającego się mózgu. Aksony komórek zwojowych siatkówki muszą trafić do wzgórza w środku mózgu a stąd od kory wzrokowej z tyłu głowy, a ich kierunek wzrostu określany jest przez stężenie czynników wzrostu. Część nie trafia w odpowiednie miejsce i musi być usunięta (synestezje mogą być pozostałością po takich nietrafionych połączeniach). Neurony muszą odbierać i wysyłać impulsy pokazując swoją przydatność by nie zostać uśmiercone, a jeśli wyślą całą salwę kilkuset impulsów muszą odpocząć by zacząć znowu reagować na pobudzenie.

Z tysiąca powodów neurony mogą więc nie spełniać swoich funkcji. Mózg broni się usuwając takie neurony i zbędne połączenia. W ciężkich przypadkach prowadzi to do śmierci organizmu, w nieco łżejszych do chorób neurodegeneracyjnych i poważnych problemów psychiatrycznych, takich jak autyzm. Nic więc dziwnego, że badania genetyczne zakrojone na szeroką skalę wskazały na setki genów, których mutacje mogą przyczynić się do powstania autyzmu, ale każda z tych mutacji została znaleziona u niewielu osób (rzędu jednego procenta z ponad 1000 badanych), podczas gdy dla 80% przypadków korelacje pomiędzy mutacjami a występowaniem

choroby są zbyt słabe i mogą być wynikiem czystego przypadku. Autyzm, schizofrenia czy padaczka to prawdopodobnie wynik źle działających neuronów, niezdolnych do prawidłowej współpracy. Może to dotyczyć jednego lub kilku typów neuronów, jednego lub wielu obszarów mózgu, może być wiele rodzajów uszkodzeń, a więc są to choroby nieskończenie różnorodne, całkiem odmienne od klasycznych chorób wywołanych przez wirusy czy bakterie.

Sieci neuronów

Neurony są ze sobą połączone bardzo gęsto, w jednym milimetrze sześciennym kory mamy około 1-2 mld synaps. Całkowita liczba połączeń wynosi około 100 bilionów (10^{14}), większość to połączenia pomiędzy neuronami w korze mózgu. W pierwszych latach życia co sekundę powstaje kilka milionów nowych synaps łączących ze sobą neurony! Najwięcej synaps jest około 3 roku życia, około dwukrotnie więcej niż u dorosłego człowieka. Duża gęstość synaps w pierwszych latach życia związana jest z koniecznością spontanicznego uczenia się, analizy informacji dopływających ze zmysłów, detekcji fonemów mowy, integracji informacji z różnych źródeł, kontroli ruchów ciała, w tym precyzyjnej kontroli aparatu głosowego. Uczenie się jest w znacznej mierze specjalizacją, rzeźbieniem w neuronalnym substracie, który początkowo kojarzy wszystko ze wszystkim. W miarę nauki mózg działa coraz sprawniej, zmienia swoją strukturę pozostawiając tylko najczęściej używane ścieżki pobudzeń. W efekcie kreatywność powoli spada, a schematyczne myślenie zaczyna dominować. Do około 20 roku życia widać co parę lat wzrost gęstości synaps w różnych obszarach, po czym następuje kolejny spadek. Dotyczy to różnych płatów kory i sprzężenia pomiędzy nimi, np. jeszcze w okresie dojrzewania między 15-17 rokiem życia rośnie gęstość połączeń pomiędzy korą mózgu a jądrami podkorowymi zaangażowanymi w reakcje emocjonalne (czas by się zakochać), a przed 20 rokiem życia rośnie liczba synaps w obszarach przedczołowych (czas by wrócił rozsądek i można było wesprzeć rodzinę). Ilość substancji szarej zmniejsza się, ale odległe połączenia się wzmacniają, rośnie ilość substancji białej, tworzącej się z osłony mielinowej wokół długich aksonów, dzięki czemu rośnie szybkość przewodzenia impulsów nerwowych i poprawia się współdziałanie różnych obszarów mózgu, synchronizacja między odległymi od siebie grupami neuronów.

Powtarzanie wzmacnia połączenia pomiędzy neuronami zaangażowanymi w reprezentację pojęć pozwalając na szybkie i automatyczne skojarzenia. Procesy poznawcze można rozpatrywać jako kompresję informacji. Wszystkie informacje płynące ze zmysłów podlegają pewnej dyskretyzacji, np. wychwytywania ze wszystkich dochodzących dźwięków fonemów mowy, dzięki czemu możemy rozumieć mowę niezależnie od szybkości, wysokości głosu i drobnych zaburzeń wymowy. Podobnie układ wzrokowy uczy się rozpoznawania kontrastów, krawędzi, kształtów, kolorów, by przypisać zmiennym wrażeniom kategorię. Jabłko jest czerwone w dzień pochmurny i słoneczny, w południe i o świcie. Chociaż odbite światło jest całkiem odmienne mózgi upraszczają informacje tak, by było łatwo podjąć decyzję – wspinać się po owoce czy jeszcze poczekać. Rozpoznają kota, chociaż to co widzę jest ciągle innym obrazem. Mózgi niemowląt i dzieci rozwijają takie umiejętności w spontaniczny sposób w odpowiednim środowisku, które powinno być dostatecznie stymulujące ale niezbyt chaotyczne (Lamb i in. 2002).

Jak to się dzieje, że pomimo całej złożoności i tylu możliwych zaburzeń procesów rozwojowych, których natura nie może w pełni skorygować, większość ludzi ma sprawne mózgi i może się uczyć? Neurony zorganizowane są w dość regularne struktury. W korze mózgu o grubości 2-4 mm wyróżnić można 6 warstw, a lokalnie neurony skupiają się w minikolumnach o średnicy ułamków milimetra, liczących kilkadziesiąt tysięcy neuronów różnego typu. Minikolumny mają najwięcej połączeń pomiędzy lokalnymi neuronami wewnątrz kolumny (w pionie), a mniej pomiędzy kolumnami (w poziomie). W korze jest kilka milionów takich kolumn, w każdej tysiące mikroobwodów których parametry są dość przypadkowe. To właśnie dzięki takiej

nadmiarowości możliwe było powstanie jednostek przetwarzających informacje w sposób dość odporny na różne zakłócenia i zdolnych do ich kategoryzacji. Drobne uszkodzenia mają niewielki wpływ na działanie całego systemu, kontrolowanego w makroskali przez procesy genetyczne. Mamy te same fałdy i bruzdy, taką samą strukturę mózgu, ale całkiem inne minikolumny wykonujące jednak podobne zadania. Ich organizacja przedstawiona w postaci grafów przypomina „małe światy”, z gęsto połączonymi wewnątrznie centrami do których schodzi się wiele sygnałów z różnych obszarów. Każda kolumna może przesłać sygnały do dowolnej innej za pośrednictwem kilku pośrednich kolumn (podobnie jak można połączyć dowolnych dwóch ludzi na świecie łańcuchem około 6 pośredników, znających się osobiście). Teoretyczna analiza pokazuje, że wielka różnorodność procesów osiągnięta dzięki przypadkowym połączeniom w minikolumnach sprzyja bardziej sprawnej analizie informacji docierającej w postaci serii impulsów od receptorów z różnych zmysłów (Maass i in, 2002).

Kolumny korowe powstały prawdopodobnie jako coraz bardziej złożone generatory rytmu pozwalające prymitywnym organizmom poruszać wiciami czy wypustkami zwiększającymi przepływ wody bogatej w składniki odżywcze, a później wyginać ciało i sterować ruchem kończyn. Powielanie takich grup neuronów jest z genetycznego punktu widzenia raczej łatwe i natura znalazła dla nich nowe zastosowania nie tylko do bardziej precyzyjnej kontroli ruchu, lecz również do zapamiętywania i kojarzenia wzorców pobudzeń dochodzących od receptorów zmysłowych i generowanych wewnątrznie.

Poziom systemowy

Lokalne kolumny zajmują się analizą informacji o podobnym charakterze, dlatego można rozpatrywać większe obszary (*regions of interest*, ROI) przypisując im określone funkcje. Nie należy się jednak spodziewać pełnej lokalizacji określonych funkcji. Każdy region mózgu specjalizuje się w przetwarzaniu informacji określonego typu, bierze udział w realizacji wielu funkcji poznawczych, może też do pewnego stopnia zastępować regiony zajęte innymi czynnościami (Anderson, 2010). Istnieją duże indywidualne różnice w sposobach przetwarzania informacji przez różne mózgi. Chociaż poziom kompetencji wykonywania jakiegoś zadania może być podobny strategię mogą być różne, podobnie jak style uczenia się.

Projekt ludzkiego konektomu (*Human Connectome Project*) rozpoczęty w 2009 roku w USA, ma na celu wyróżnienie 1000 takich obszarów i zbadanie połączeń pomiędzy nimi (*connect* to po angielsku połączyć, stąd zbiór połączeń nazwano konektomem) w celu stworzenia dokładniejszej mapy powiązań aktywności regionów mózgu ludzi zdrowych i chorych. Okazało się, że różnice budowy konektomu w przypadku autyzmu czy choroby Alzheimera są wyraźnie widoczne. Sukcesy tego projektu spowodowały pojawienie się szeregu jego wariantów, tworzenia konektomu na bardziej szczegółowym poziomie (mezoskopowym lub mikroskopowym), jak i zbadania sposobu tworzenia się konektomu na etapie płodowym (*Developing Human Connectome Project*, UK 2013).

Indywidualne różnice w sposobie przetwarzania informacji przez mózgi mogą znaleźć swoje odzwierciedlenie w konektomach, chociaż na razie za pomocą technik używanych do badania połączeń obszarów mózgu nie potrafimy rozróżnić kierunku tych połączeń, a to jest bardzo istotna informacja. Różnice indywidualne w przepływie informacji będą dużo trudniejsze do zbadania niż poważne zaburzenia związane z chorobami. Leki wpływają na całe podsystemy połączone tymi samymi szlakami sygnałowymi, wykorzystujące ten sam typ neurotransmiterów do komunikacji (np. dopaminę lub serotoninę), zmieniając aktywność wielu miejsc w mózgu w sposób trudny do kontrolowania. Taka interwencja jest więc bardzo nieprecyzyjna. Neurotransmitery powstają lokalnie w neuronach ale większość jest transportowana długimi aksonami z jader znajdujących się w pniu mózgu: serotonina z jader szwu, dopamina produkowana jest w miejscu sinawym pnia mózgu, w istocie czarnej i

brzusznym polu nakrywki śródmózgowia, acetylocholina w jądrze konarowo-mostowym nakrywki i innych miejscach.

Pień mózgu odpowiedzialny jest za utrzymanie homeostazy organizmu i kontroluje wiele funkcji: oddychanie, ciśnienie tętnicze, ssanie, żucie, połykanie, odruchy wymiotne, kichanie, kaszel, ziewanie, wydzielanie potu. Może też hamować bądź pobudzać duże obszary mózgu, przygotowując z grubsza rodzaj działania, podczas gdy jądra podstawy mózgu wybierają właściwą formę działania, a kora mózgu planuje i kontroluje szczegóły. Układ nagrody, wykorzystujący szlaki dopaminowe przesyłające informację pomiędzy korą przyśrodkową, oczodołowo-czołową, jądrem półleżącym, ciałem migdałowatym i śródmózgowiem pomaga wzmacniać i uczyć się przewidywania zachowań przyjemnych. Antycypując jakie zachowania i przypisując im wartość pozwala to tworzyć cele i ukierunkować działanie (Berns, 2005; Gottfried, O'Doherty & Dolan, 2003; Schultz, 2000). Ogólny poziom pobudzenia stwarzający motywację do działania regulowany jest przez twór siatkowaty pnia mózgu.

Reprezentacja celów (Berns, 2005) tworzy się w grzbietowo-bocznej korze przedczołowej, ale również angażuje korę ciemieniową (powstają w niej wyobrażenia relacji przestrzennych) oraz korę przedruchową (przygotowanie do działania). Motywacja, chęć do działania, jest rezultatem antycypacji nagrody, pozytywnych emocji. Jest to skorelowane z aktywnością brzuszno-prążkowiego, stanowiącego część jąder podstawy mózgu. Sprawność wykonywania złożonych funkcji, takich jak planowanie, rozumowanie, rozwiązywanie problemów, inicjacja i zablokowanie różnych zachowań, są silnie skorelowane z wynikami testów określających inteligencję (IQ) jak i testów pamięci werbalnej i wzrokowej (Duff, i in. 2005). Pamięć krótkotrwała to aktywacja podzbioru neuronów, zmieniająca przepływ aktywacji neuronalnej. Nie można odróżnić od siebie zbyt wielu takich aktywnych podsieci, bo będą na siebie wzajemnie wpływać, więc pamięć krótkotrwała ma bardzo niewielką pojemność. Ślad pozostawiony po jej aktywacji powoduje łatwiejsze pobudzenie wcześniej aktywnych neuronów, a więc różne efekty torowania, mające podświadomy wpływ na podejmowane decyzje. Badanie takich efektów należy do głównego nurtu psychologii poznawczej.

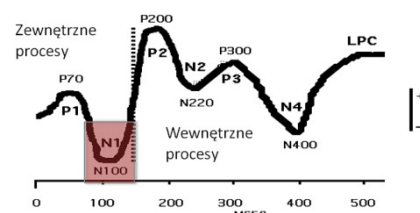
Utrzymywanie kilku rzeczy jednocześnie w pamięci i powrót do nich po odwróceniu uwagi jest bardzo ważną umiejętnością, pozwalającą na rozwiązywanie problemów na poziomie wyobraźni, rozumienie złożonych sytuacji i sensu zdań (Caplan & Waters, 1999), utrzymywanie alternatywnych planów działania. Kora przedczołowa jest siedliskiem takiej pamięci roboczej (Baddeley, 2002). Jej pojemność jest niewielka, rzędu 3-4 złożonych obiektów lub 4-9 porcji prostszych informacji, takich jak cyfry czy znaki graficzne (Cowan, 2005). Pojemność pamięci roboczej silnie koreluje się z ilorazem inteligencji. Duża pojemność pamięci roboczej oznacza zdolność mózgu do odróżnienia od siebie wielu jednocześnie pojawiających się w nim wzorców aktywacji, co wymaga precyzyjnej synchronizacji odległych grup neuronów.

Poziom funkcji poznawczych

Na tym poziomie wyniki testów behawioralnych próbuje się powiązać ze stanami mentalnymi jak i z procesami zachodzącymi w mózgu. Stany mentalne opisuje się z punktu widzenia przetwarzania informacji posługując się pojęciami psychologicznymi. Wiele funkcji poznawczych związanych z percepcją, pamięcią czy działaniem ma swoje modele neuronowe, które pozwalają za pomocą symulacji stawiać hipotezy nadające się do eksperymentalnej weryfikacji za pomocą metod neuroobrazowania. W ten sposób psychologia eksperymentalna zbliża się do badań nad mózgiem.

Nauka czytania może być utrudniona z powodu dysleksji fonologicznej, a ta związana jest z niewłaściwą kategoryzacją fonemów, najmniejszych rozróżnialnych części języka mówionego. Może to być związane ze zbyt małą gęstością synaps w korze słuchowej, lub zbyt słabymi połączeniami tej kory z innymi obszarami mózgu. Można to badać patrząc na strukturę słuchowych potencjałów wywołanych (ERP, Event-Related Potentials). Powtarzająca się stymulacja za pomocą prostego dźwię-

ku lub serii sylab wywołuje w mózgu specyficzne echo. Po uśrednieniu sygnału EEG z wielu powtórzeń otrzymuje się charakterystyczne przebieg pokazujące jak szybko i jak silnie sygnał pobudza korę i powraca, wskazując na złożoność sieci połączeń i na szybkość z jaką dochodzi do synchronizacji neuronów pomiędzy korą słuchową i innymi obszarami mózgu. Pierwszą wyraźną cechą tego sygnału jest minimum pojawiające się około 100 ms po prezentacji (N100), pokazujące synchronizację w korze słuchowej, interpretowaną jako uwaga skierowana automatycznie na ten bodziec. Wszystkie pozostałe cechy ERP są związane z różnymi aspektami przetwarzania informacji przez mózg i zależą od sposobu prowadzenia doświadczenia. Co ciekawe, u dzieci do 10 roku życia reakcja po 100 ms jest dodatnia (P100), typowy kompleks N100-P200 powstaje dopiero później. Być może jest to spowodowane wolniejszą reakcją mózgu dziecka z powodu słabszej mielinizacji i zbyt gęstej sieci połączeń synaptycznych, powodujących rozproszenie aktywacji neuronalnych.



Prawidłowe słyszenie mowy, a później nauka czytania, wymaga precyzyjnego mapowania dźwięków na kategorie jakimi są fonemy, jak i grafemów (logogramów) na fonemy, które łącząc się w łańcuchy aktywacji kory skroniowej i czołowej (obszar Broca) tworzą fonologiczną reprezentację słów (Grossberg, 2003), pobudzających następnie dalsze obszary mózgu, kojarzące brzmienie z semantycznymi własnościami danego słowa, nadając mu znaczenie. Aktywacje związane z rozpoznaniem fonologicznej formy słowa w ciągu 90 ms rozchodzą się po mózgu (Pulvermueller, 2003, Pulvermueller i in. 2005) pozwalając na skojarzenia i interpretację słów w danym kontekście. Reprezentacja pojęć łączy się więc z informacjami zapamiętanymi dzięki percepcji i eksploracji świata, pętlami postrzeganie-działanie (początkowo działanie może być tylko śledzeniem wzrokiem, słuchem, okazywaniem emocji) utworzonymi jeszcze przed nauczeniem się symbolicznego języka. Symbole w mózgu są więc prototypami aktywacji pozwalającymi na lepszą kategoryzację stanów mózgu, zawierającymi składową fonologiczną (rozpoznawanie słowa), sposób jego wymawiania (aktywacje kory ruchowej sterującej aparatem głosowym), jak i wzrokowe, słuchowe, dotykowe, smakowe, węchowe, ruchowe i emocjonalne aktywacje związane ze stanem odpowiedniej kory. Takie kodowanie znaczenia symboli automatycznie pozwala na powstawanie fonologicznych i semantycznych skojarzeń pomiędzy pojęciami.

Różnice zdolności poznawczych dzieci można dostrzec tuż po ich urodzeniu badając wywołane potencjały słuchowe. Testy reakcji ERP na grupy podobnych do siebie sylab bi, di, gi; be, de, ge; bu, du, gu; ba, ga, da, pozwalają zobaczyć zróżnicowanie reakcji na te dźwięki. Im większe jest to zróżnicowanie tym bardziej precyzyjnie mózgi radzą sobie z percepcją mowy, co zapewne związane jest z gęstością synaps i szybkością synchronizacji grup neuronów. Na podstawie takich badań podzielono dzieci na takie, które rozwiną się normalnie, będą miały problemy z czytaniem, lub będą miały dysleksję. Badania wykonane 8 lat później potwierdziły z dużą dokładnością (około 80-90%) te przewidywania (Molfese 2008; Molfese & Molfese 2000, Molfese i in. 2002). Niemowlęta reagujące wolniej o 200 ms w wieku 8 lat reagowały wolniej już o 500 ms, a rozpoznawanie dźwięków mowy nie było u nich stabilne, co ujawniało się jako problemy związane z czytaniem i rozumieniem czytanego tekstu. Długookresowe badania rozpoznawczej pamięci wzrokowej oparte na testach selektywnej uwagi (Fagan i in. 2009) prowadzone w wieku 6-12 miesięcy również potwierdziły silną korelację wyników w tak wczesnym okresie z wynikami testów na inteligencję w okresie dorostania. Te i wiele innych badań wskazują na wagę okresu formowania się mózgu przed narodzinami i w okresie niemowlęcym oraz na kontynuację wrodzonych zdolności. Jednakże część przewidywań się nie sprawdziła. Genetyka nie determinuje zwykle w absolutny sposób możliwości rozwoju, jeśli środowisko stymuluje rozwój w odpowiedni sposób mózgi mogą się zmie-

nić. Z badań nad szczurami wiadomo, że odpowiednio wzbogacone środowisko spowodowało zwiększenie gęstości synaps o 25%, komórek glejowych 12-14%, wzrosła grubość kory mózgu (Simpson & Kelly, 2011). Co więcej, zmiany te były długotrwałe, efekty pozytywne pozostały nawet po przeniesieniu szczurów do uboższego środowiska.

Zamiast skupiać się na korekcy efektów nieprawidłowego rozwoju potrzebna jest więc wczesna stymulacja i prewencja. Nie wiemy jeszcze jaka stymulacja rozwoju zdolności poznawczych jest najlepsza na poziomie niemowlęcia, ale to właśnie będziemy próbować odkryć w najbliższych latach. Podstawą wszystkich funkcji poznawczych jest prawidłowy rozwój percepcji i zdolności motorycznych, precyzyjna dyskretyzacja doświadczenia umożliwiająca rozróżnianie wszystkiego co istotne. Segmentacja doświadczenia umożliwia symboliczne myślenie. Na podstawie analizy aktywności widocznej za pomocą funkcjonalnego rezonansu w czasie oglądania filmu Zacks i in. (2010) doszli do wniosku, że mózg w automatyczny sposób dokonuje segmentacji swoich stanów, powstających w czasie naturalnych czynności. Mózg wykorzystuje wiele komplementarnych szlaków łączących informację napływającą z różnych modułów w jedną całość, zwiększając w ten sposób pewność podejmowanych decyzji (Grossberg 2000). Należy więc od najwcześniejszych lat uczyć właściwego sposobu segmentacji, tworzyć dostatecznie bogaty repertuar kategorii, zarówno dotyczących percepcji, działania, jak i tworzenia skojarzeń. Materiał, który daje się dobrze przyswoić powinien być w spójnych, niezbyt dużych porcjach, powinien łączyć się z tym, co już znane na wiele sposobów. W ten sposób nauczone elementy będą łatwo „przychodziły do głowy” dzięki licznym skojarzeniom semantycznym.

Innym aspektem ważnym dla rozwoju inteligencji i kreatywności jest szybkość i synchronizacja zachodzących w mózgu procesów. Mielinizacja długich aksonów pomaga w grupowaniu i sprawniejszym przetwarzaniu informacji (Singer 1999). Zależy od tego szybkość myślenia, powstawania spontanicznych myśli i obrazów. Kreatywność nie jest tożsama z inteligencją, nie wystarczy wytrenowany mózg, w którym mogą powstać liczne potencjalnie dostępne wzorce aktywności reprezentujące pojęcia pozwalające na inteligentne rozumowanie (Duch, 2007, 2007a). Spontaniczne przypadkowe procesy pobudzające takie wzorce aktywności, łączące fragmenty tych wzorców ze sobą w sposób zależny od kontekstu, potrafią stworzyć interesujące konkurujące ze sobą idee. Selektywne rozpoznanie interesujących wzorców oparte jest na skojarzeniach i emocjonalnym pobudzeniu. Model psychologiczny kreatywności opracowany w latach 1960 przez D.T. Campbella i rozwinięty przez D.K. Simontona (2010) odwołuje się do takich „ślepych wariacji” i selektywnego filtrowania (Blind Variation Selective Retention, BVSR). Można za pomocą symulacji komputerowych pokazać, że takie podejście pozwala na tworzenie nowych nazw (neologizmów) opisujących produkty czy strony internetowe w kreatywny sposób bardzo przypominający nazwy wymyślone przez ludzi, gdyż około 2/3 wszystkich tak stworzonych nazw było już w użyciu (Duch i Pilichowski, 2007).

Uczenie się wymaga fizycznych zmian w mózgu, które możliwe są dzięki neuroplastyczności. Procesy za tym stojące można opisywać na poziomie molekularnym, pokazując jak wzmacniają się lub osłabiają połączenia synaptyczne. Farmakologiczna interwencja może wspomagać neuroplastyczność w przypadku problemów z pamięcią, należy jednak pamiętać, że pomiędzy wierną pamięcią, która dokładnie odtwarza przeżyte epizody, silnie wiążąc w prawie jednoznaczny sposób myśl (wzorzec aktywności mózgu), a zdolnością do generalizacji i kreatywnością z tego wynikającą jest delikatny kompromis. Byłoby idealnie, gdyby można było czasowo zwiększać neuroplastyczność manipulując możliwościami uczenia się – taka jest właśnie rola emocji, które wpływają na większą aktywność mózgu, dzięki czemu kreatywność i uczenie się staje się łatwiejsze. Możliwa jest też bezpośrednia aktywacja lub dezaktywacja różnych obszarów mózgu w czasie pracy za pomocą magnetycznej stymulacji przezczaszkowej (transcranial magnetic stimulation, TMS) jak i bezpośredniej stymulacji prądem (direct current stimulation, DCS). Są doniesienia

pokazujące, że taka stymulacja zwiększa szybkość uczenia się jak i umożliwia większą kreatywność (Chi & Snyder, 2011), jednakże nie znane są długofalowe skutki takich procedur.

Style uczenia się

Odróżnianie indywidualnych stylów uczenia się stało się bardzo popularne w pedagogice po publikacji książki Davida Kolba (1984) i opracowaniu przez niego komercyjnych testów opartych na kwestionariuszu LSI (*Learning Styles Inventory*). Kolb analizował proces uczenia się z dwóch perspektyw: preferowanego sposobu postrzegania, opartego na konkretnym doświadczeniu lub abstrakcyjnym myśleniu, oraz sposobu działania, opartego na eksperymentowaniu albo obserwacji refleksyjnej (Pashler i in. 2008). Ten podział używany jest jako podstawa metodologiczna wielu projektów (np. <http://smarteducation.pl>) i prowadzi do wyróżnienia 4 skrajnych typów uczenia się:

- dywergentów, preferujących bezpośrednio doświadczenie i refleksyjną obserwację;
- asymilatorów, o preferencjach abstrakcyjno-obszernych;
- konwergentów, preferujących działanie i abstrakcyjne myślenie;
- akomodatorów, nastawionych na działanie i doświadczenie.

Kwestionariusz LSI ma za zadanie określić, który z tych stylów preferuje dana osoba. Neuropsycholodzy krytycznie podszli do tych pomysłów, nie widząc podstaw związanych z procesami poznawczymi, które by uzasadniały taki podział. Istotnie, pojęcia tworzone przez psychologów trudno jest zwykle odnieść do bardziej fundamentalnych, mierzalnych cech związanych z pracą mózgu. Dlatego model Kolba lepiej zastąpić podobnym ale lepiej ugruntowanym modelem opisanym poniżej. Należy rozróżnić 3 typy aktywności mózgu:

- 1) Procesy na poziomie kory analizującej dane zmysłowe S, gdzie powstają wzorce aktywności konieczne do rozróżniania dźwięków, kształtów, wrażeń dotykowych itd. (głównie kora wzrokowa, słuchowa, czuciowa).
- 2) Procesy centralne C, związane z abstrakcyjnymi pojęciami, które nie mają silnych składowych zmysłowych i angażują głównie korę skojarzeniową (ciemieniową, skroniową i przedczołową).
- 3) Procesy motoryczne, związane z aktywacją kory ruchowej, wyobraźnią ruchową jak i fizycznymi manipulacjami (głównie kora czołowa, jądra podstawy, mózdzek).

Pierwszy wymiar, który proponuje Kolb to dominacja procesów związanych ze zmysłami, czyli pętli $S \leftrightarrow S$ nad procesami abstrakcyjnymi, czyli pętlami wobszarach skojarzeniowych $C \leftrightarrow C$. Silne projekcje kory skojarzeniowej do obszarów kory wzrokowej i słuchowej odpowiedzialne są za żywą wyobraźnię, w której dominuje myślenie epizodyczne. W ekstremalnej formie widać to u osób cierpiących na autyzm. Potrafią oni często zapamiętać dokładnie wiele szczegółów, w ich obszarach zmysłowych tworzą się silnie pobudzone pętle aktywności, które dominują i trudno je przerwać i przenieść uwagę na nowe bodźce. W efekcie takie osoby mogą nie reagować na głośne wezwania, pogrążeni w świecie swojej wyobraźni. Nie potrafią też uogólnić swoich przeżyć, lub powiązać ich z wiedzą abstrakcyjną. W przypadku zespołu Aspergera, łagodniejszej formy autyzmu, procesy centralne są bardziej aktywne ale towarzyszy im zawsze aktywacja obszarów zmysłowych $C \leftrightarrow C \leftrightarrow S$, osoby te mają więc trudności w rozumieniu pojęć metaforycznych, gdyż zbyt silnie kojarzą im się z konkretnymi obiektami.

Jeśli projekcje zstępujące do kory zmysłowej są słabe aktywność mózgu zdominują procesy centralne $C \leftrightarrow C$, co nie sprzyja żywej wyobraźni zmysłowej, jest natomiast korzystne dla sprawnego myślenia na poziomie abstrakcyjnym. Ten typ myślenia widoczny jest u logików, algebraików, fizyków teoretycznych, filozofów, teologów i ideologów, obracających się w świecie abstrakcyjnych idei. Projekcje wstępu-

jące, od kory zmysłowej do obszarów skojarzeniowych, aktywują w takich przypadkach procesy centralne.

Drugi wymiar kwestionariusza Kolba, działanie i obserwacja, można związać z aktywnością angażującą obszary ruchowe i centralne $M \leftrightarrow C$, jak i odruchowe bezrefleksyjne działania $M \leftrightarrow S$. Osoby cierpiące na autyzm wykazują stereotypie ruchowe z powodu silnych aktywacji na poziomie $M \leftrightarrow M$, jest to również źródłem echolalii.

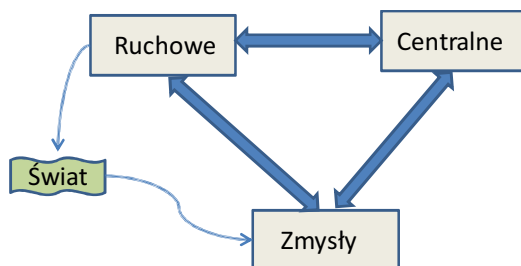
Z tego punktu widzenia można łatwo scharakteryzować 4 podstawowe style uczenia się Kolba.

Asymilatorzy mają prawdopodobnie słabe projekcje $S \rightarrow M$ i $C \rightarrow M$, za to silne projekcje $S \rightarrow C$ i aktywność na poziomie centralnym $C \leftrightarrow C$, dzięki czemu są skłonni do obserwacji, refleksji i myślenia abstrakcyjnego, opartego o indukcję.

Konwergency mają również silne pętle na poziomie centralnym $C \leftrightarrow C$, a ich skłonność do działania wynika z projekcji $C \rightarrow M$, przez co łączą dedukcyjne myślenie z aktywnym eksperymentowaniem. Powstaje tu dodatkowa pętla działanie-postrzeżenie rezultatów-procesy centralne, czyli $M \rightarrow S \rightarrow C$.

Dywergerzy zdominowani są przez percepcję $S \leftrightarrow S$ ale też mają silne projekcje $C \leftrightarrow S$, co sprzyja refleksji nad obserwacjami. Połączenia $C \rightarrow S$ są najwyraźniej słabo bo nie przekłada się to na działanie, za to żywa wyobraźnia pozwala im tworzyć nowe idee.

Akomodatorzy nie mają przewagi zmysłowych, centralnych czy ruchowych obszarów, projekcje biegną we wszystkich kierunkach, w pętłę postrzeżenie-działanie wkradają się procesy centralne $S \leftrightarrow C \leftrightarrow M$. W efekcie mamy aktywne działanie i chęć doświadczania.



Niestety badania konektomu nie pokazują kierunku takich projekcji, ale można się spodziewać odkrycia różnic indywidualnych, które będą pasować z grubsza do opisanego schematu. Tego typu klasyfikacja pozwala na wprowadzenie nie tylko testów psychologicznych, lecz również powiązanie z testami wykorzystującymi EEG.

Wiele procesów poznawczych – percepcja niejednoznacznych obrazów, przypominanie, planowanie, rozwiązywanie problemów, spontaniczna aktywność, daje się przedstawić w 3 krokach.

- Przygotowanie mózgu i uświadomienie sobie zadania.
- Oczekiwanie na pojawienie się nieświadomych skojarzeń, które pozwolą zrobić krok w kierunku rozwiązania.
- Świadome dostrzeżenie najciekawszych skojarzeń.

Uczenie się nowych rzeczy musi się opierać na wcześniej zdobytej wiedzy. Podstawą jest istniejąca struktura pojęć i relacji między nimi (transformacji). To przeszczerń, w której pojawić się powinny nowe elementy. Jeśli jednak nie ma na czym się oprzeć uczenie nie będzie efektywne, pozostanie na poziomie formułek przechowywanych w pamięci. Podstawą uczenia w szkole powinna być odpowiednio dobrana wiedza. Pracuje nad tym w USA od ponad ćwierć wieku fundacja *The Core Knowledge Foundation*, proponując zestaw podstawowych pojęć, które każdemu się przydadają. Na poziomie przedszkola są to pojęcia pozwalające nadać sens liczbom, orientować się w czasie i przestrzeni. Na poziomie szkoły (do 8 klasy) program ten skupia się na przekazywaniu treści przydatnych do zrozumienia świata, podkreślając rolę matematyki, ale również muzyki, rozumienia i tworzenia sztuki.

Warunkiem uczenia się jest też możliwość aktywacji kontekstów, z którymi muszą się połączyć nowe elementy. Dlatego uczenie wymaga skupienia, w mózgu nie powinno być zbyt wiele jednocześnie zachodzących procesów. Istotna jest też rola procesów wglądu, nagłego dostrzeżenia rozwiązania. Jak pokazały eksperymenty wymaga ona zaangażowania niedominującej półkuli mózgu (Jung-Beeman i in. 2004; Bowden i in. 2005; interpretacja teoretyczna jest w pracy Duch, 2007).

Informacja wymagająca analizy musi się najpierw znaleźć w pamięci roboczej. Skupienia nad problemem, uwaga pozwalająca wytłumaczyć inne procesy, jest na tym etapie najważniejsza. Jeśli podobne problemy były już rozwiązywane wielokrotnie odpowiednie skojarzenia łatwo się pojawią, jeśli jednak problem jest nowy i trudny potrzebne będzie kreatywne myślenie. Aktywacja musi dotrzeć do tych obszarów mózgu w których mogą się pojawić jakieś przydatne skojarzenia. Można to zinterpretować jako wnioskowanie przez wyspecjalizowane procesory, które potrafią coś dodać do bieżącego stanu rozwiązywania problemu (Baars, 1988). Zmieniony wzorzec aktywacji pojawia się wówczas jako interesujący krok w kierunku rozwiązania. Ten cykl skupiania, skojarzenia i rozpoznawania kolejnych kroków powtarza się aż znalezione zostanie rozwiązanie lub neurony zaangażowane w reprezentację problemu będą musiały odpocząć. Rozwiązaniem problemu jest seria skojarzeń od wzorca aktywacji reprezentującego problem, poprzez serię transformacji rozpoznawanych jako dopuszczalne, do stanu końcowego.

Takie ujęcie przedstawia proces uczenia się w uniwersalny sposób: przygotowanie mózgu, wprowadzenie informacji o problemie i oczekiwanie na rozwiązanie. Ten proces może przebiegać bez wysiłku o ile siatka pojęciowa jest wystarczająca i uwaga skupiona jest na problemie. Do przygotowania mózgu do pracy warto użyć technik relaksacji umysłu (Benson, 2001), albo fizycznych ćwiczeń, które wymagają skupienia nad wrażeniami płynącymi z ciała. W przypadku muzyków i tancerzy duży sukces odniosły techniki biofeedback (Gruzelier, 2009).

KONKLUZJE I PODSUMOWANIE

Pełne zrozumienie procesów związanych z uczeniem się jest jeszcze odległe i wymagać będzie stworzenia nowej gałęzi wiedzy, neurokognitywnej fenomiki. Na razie tylko psychiatria dąży w podobnym kierunku, ale jej zadanie jest łatwiejsze, gdyż wymaga znalezienia korelacji pomiędzy procesami na poziomie genetyki, epigenetyki, szlaków sygnałowych w komórkach, budowy neuronów i sieci neuronalnych, a objawami i chorobami psychicznymi. Pewne korelacje już udało się odkryć dzięki zakrojonym na większą skalę badaniom genetycznym i badaniom ludzkiego konektomu. Wpływ procesów biologicznych na uczenie się będzie wymagał szczegółowego opisu fenotypów zdrowych ludzi i zmian zachodzących w nich pod wpływem uczenia się. Jesteśmy na początku długiej drogi. Przegląd czynników na 7 poziomach, które warto rozróżnić i uwzględnić, zakończony został rozważaniami na temat stylów uczenia się. Popularny model Kolba można związać z procesami zachodzącymi w korze zmysłowej, skojarzeniowej i ruchowej. Sposób działania mózgu można powiązać z procesami rozwojowymi kształtującymi sieci neuronalne, własnościami neuronów i poziomem molekularnym, od którego te własności zależą.

Przedstawiona tu analiza jest oparta na solidniejszych podstawach niż psychologiczne rozważania Kolba i może zostać zweryfikowana przy użyciu metod neuroobrazowania. Można w ten sposób wyjaśnić wiele zjawisk związanych z uczeniem się zarówno osób zdrowych, dyslektyków, a nawet cierpiących na autyzm. Wiele idei pojawiających się w pedagogice będzie można powiązać z fenomiką neurokognitywną, dając im pewniejsze podstawy naukowe. Dotyczy to nie tylko procesów uczenia się lecz również kreatywności, procesów wglądu, intuicji, nabywania umiejętności, zagadnień, które jeszcze niedawno wydawały się całkiem tajemnicze. Nie poruszono tu wielu ważnych idei związanych z edukacją, np. roli emocji, czynników wpływających na motywację, wolę działania, efektów zmęczenia woli, ustalania celów i innych ważnych zagadnień. Nie ma jeszcze nawet zgody co do celu kształce-

nia, który należałoby odnieść do procesów rozwojowych, poczynając od okresu prenatalnego. Na wszystkich etapach badań i wspierania samego procesu edukacyjnego komputery, lub też ogólniej wszelkie urządzenia przetwarzające informację, pełnić będą bardzo istotną rolę.

Podziękowania. Praca powstała dzięki wsparciu Narodowego Centrum Nauki, grant MNiSW/N519 5781 38.

REFERENCES

- Baars, B.J. (1998). *A cognitive theory of consciousness*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Baddeley, A.D. (2002). Is working memory still working? *European Psychologist*, 7, 85-97.
- Benson, H. (2001). *The Relaxation Response*. HarperCollins; <http://www.relaxationresponse.org/>
- Berns, G. (2005). *Satisfaction: The science of finding true fulfillment*. New York: Henry Holt.
- Bowden, E.M., Jung-Beeman, M., Fleck, J., & Kounios, J. (2005). New approaches to demystifying insight. *Trends in Cognitive Science*, 9, 322-328.
- Caplan, D., & Waters, G.S. (1999). Verbal working memory and sentence comprehension. *Behavioral and Brain Sciences*, 22, 77-94.
- Chi, R. P., & Snyder, A. W. (2011). Facilitate insight by non-invasive brain stimulation. *PLoS One*, 6(2), e16655.
- Cowan, N. (2005). *Working memory capacity*. New York: Psychology Press.
- Dana Foundation books, *Learning Throughout Life*, and others, are available at the address: <http://www.dana.org/danaalliances/edab/publications.aspx>
- Duch, W. (2005). Brain-inspired conscious computing architecture. *Journal of Mind and Behavior*, 26(1-2), 1-22.
- Duch W. (2007) Intuition, Insight, Imagination and Creativity. *IEEE Computational Intelligence Magazine* 2(3), 40-52, 2007.
- Duch, W. (2007a) *Creativity and the Brain*. In: A Handbook of Creativity for Teachers. Ed. Ai-Girl Tan, Singapore: World Scientific Publishing, pp. 507-530, 2007
- Duch W, Pilichowski M. (2007). Experiments with computational creativity. *Neural Information Processing - Letters and Reviews* 11, 123-133.
- Duff, K., Schoenberg, M.R., Scott, J.G., & Adams, R. L. (2005). The relationship between executive functioning and verbal and visual learning and memory. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 20, 111-122.
- Fagan, J.F, Holland, C.R, Wheeler, K. The prediction, from infancy, of adult IQ and achievement, *Intelligence* 35(3), 225-231, 2007.
- Freimer, N., Sabatti, C. (2003) The Human Phenome Project. *Nature Genetics* 34, 15 – 21.
- Gottfried, J.A., O'Doherty, J., & Dolan, R. J. (2003). Encoding predictive reward value in human amygdala and orbitofrontal Cortex. *Science*, 301, 1104-1107.
- Grossberg, S. (2000). The complementary brain: Unifying brain dynamics and modularity. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 233-246.
- Grossberg, S. (2003). Resonant neural dynamics of speech perception. *Journal of Phonetics*, 31, 423-445.
- Gruzelier, J. (2009) A theory of alpha/theta neurofeedback, creative performance enhancement, long distance functional connectivity and psychological integration. *Cognitive Processes* 10 Suppl 1:S101-9
- Jung-Beeman, M., Bowden, E.M., Haberman, J., Frymiare, J.L., Arambel-Liu, S., Greenblatt, R., Reber, P.J., & Kounios, J. (2004). Neural activity when people solve verbal problems with insight. *PLoS Biology*, 2(4), 500-510.

- Kolb, D. (1984). *Experiential learning: Experience as the source of learning and development*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Lamb, M.E., Bornstein, M.H., Teti, D.M. (2002). *Development in Infancy*. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Publishers.
- Lent R, Azevedo FA, Andrade-Moraes CH, Pinto AV. (2012). How many neurons do you have? Some dogmas of quantitative neuroscience under revision. *European Journal of Neuroscience* 35(1):1-9
- Maass W., Natschlaeger T., Markram H. (2002) Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations. *Neural Computation*, 14(11):2531-2560.
- Molfese, D.L. (2000). Predicting dyslexia at 8 years of age using neonatal brain responses. *Brain and Language*, 72, 238-245.
- Molfese, D.L., & Molfese, V.J. (2000). The continuum of language development during infancy and early childhood: Electrophysiological correlates. In C. Rovee-Collier, L. P. Lipsitt & H. Hayne (Eds.), *Progress in infancy research* (Vol. 1, pp. 251-287). Mahwah, N.J.: Lawrence Erlbaum Associates.
- Molfese D.L, Molfese V.J, i in. (2002) Reading and cognitive abilities: Longitudinal studies of brain and behavior changes in young children. *Annals of Dyslexia* 52:99–119.
- Pashler, H.; McDaniel, M.; Rohrer, D.; Bjork, R. (2008). Learning styles: Concepts and evidence. *Psychological Science in the Public Interest* 9: 105–119
- Pesonen, A., Raikonen, K., Strandberg T.E., Jarvenpaa, A. (2005). Continuity of maternal stress from the pre- to the postnatal period: associations with infant's positive, negative and overall temperamental reactivity. *Infant Behavior and Development*, 28, 36-47.
- Pulvermuller, F. (2003). *The neuroscience of language. On brain circuits of words and serial order*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pulvermuller, P., Shtyrov, Y., & Ilmoniemi, R. (2005). Brain signatures of meaning access in action word recognition. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(6), 884-892.
- Schultz, A. (2000). Multiple reward signals in the brain. *Nature Reviews of Neuroscience* 1(3), 199-207.
- Simonton, D.K, Creative thought as blind-variation and selective-retention: Combinatorial models of exceptional creativity. *Physics of Life Reviews* 7(2), 156-179, 2010
- Simpson, J., & Kelly, J. P. (2011). The impact of environmental enrichment in laboratory rats – behavioural and neurochemical aspects. *Behavioural Brain Research*, 222(1), 246-264.
- Singer, W. (1999). Neuronal synchrony: a versatile code for the definition of relations? *Neuron*, 24, 49–65.
- Stumpf, M.P.H, Thorne, T., de Silva, E., Stewart, R., Jun An, H., Lappe, M., & Wiuf, C. (2008) Estimating the size of the human interactome. *PNAS* 105 (19), 6959–6964.
- Zacks J.M, Speer N.K, Swallow K.M, Maley C.J. The brain's cutting-room floor: segmentation of narrative cinema. *Frontiers in human neuroscience* 4, 2010, 10.3389/fnhum.2010.00168.

Biografia

Włodzisław Duch rozpoczął karierę naukową od fizyka teoretycznej (tytuł profesora otrzymał w 1997 roku), w latach 1990 zajmował się głównie informatyką, w tym sztuczną inteligencją i uczeniem maszynowym, a następnie rozwojem nauk kognitywnych. Jako Visiting Professor pracował przez wiele lat w Japonii, Niemczech, Singapurze i USA. Obecnie jest Prorektorem ds. Badań Naukowych i Informatyzacji Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu. Więcej informacji można znaleźć w Internecie wpisując hasło “W. Duch”.

Copyright

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 3.0 Unported License. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>