

# Neuroplastyczność – perspektywa historyczna oraz współczesna w ujęciu filozoficznym, psychologicznym, biologicznym oraz klinicznym

Neuroplasticity – historical and contemporary perspective from  
a philosophical, psychological, biological, and clinical perspective

Bartosz Bagrowski

ORCID 0000-0001-7402-8418

Poznań

**Streszczenie.** Neuroplastyczność stanowi biologiczne podłoże pamięci oraz procesów uczenia się, jednak nadal nie została w pełni poznana. Początki filozoficzno-naukowego rozważania na temat fizycznych zmian w układzie nerwowym wskutek uczenia się sięgają aż do starożytności. Wiele z dawnych koncepcji znajduje swoje odzwierciedlenie w aktualnych teoriach naukowych, np. w neuropsychologii. Choć początkowo koncepcje te miały charakter teoretyczny i funkcjonalny (np. filozoficzne ujęcie śladu pamięciowego), to jednak współczesne wyjaśnienia korzystają głównie z aparatu pojęciowego biologii molekularnej.

**Abstract.** Neuroplasticity is the biological basis of memory and learning processes, but it is still not fully understood. The beginnings of philosophical and scientific considerations about physical changes in the nervous system as a result of learning date back to antiquity. Many of the old concepts are reflected in current scientific theories, e.g. in neuropsychology. Although initially these concepts were theoretical and functional in nature (e.g. a philosophical approach to the memory trace), modern explanations mainly use the conceptual apparatus of molecular biology.

**Słowa kluczowe:** dusza, engram, neuronauka, sieci neuronalne, substytucja sensoryczna

**Keywords:** soul, engram, neuroscience, neural networks, sensory substitution

## Wprowadzenie

Prawidłowe funkcjonowanie organizmu zapewnia komunikacja międzykomórkowa oraz skoordynowana współpraca pomiędzy poszczególnymi strukturami organizmu. W tym kontekście zwraca się szczególną uwagę na układ nerwowy, który nie

tylko odpowiada za sprawne przesyłanie informacji, ale również posiada zdolność do dynamicznych zmian w odpowiedzi na warunki wewnętrzne oraz zewnętrzne. Wspomniane funkcje układu nerwowego wynikają z jego dwóch podstawowych cech, jakimi są pobudliwość oraz plastyczność. Dzięki pobudliwości poszczególne komórki nerwowe (neurony) są zdolne do reagowania na nadchodzące bodźce – reakcja ta polega na wygenerowaniu potencjału czynnościowego oraz przekazaniu go kolejnym komórkom nerwowym poprzez synapsy. Plastyczność jest cechą, dzięki której w określonych neuronach oraz ich układach mogą powstawać trwałe przekształcenia, zwane zmianami neuroplastycznymi. Zmiany te, nazywane również śladami pamięciowymi, mogą mieć zarówno charakter funkcjonalny (na przykład zmiana siły synapsy), jak i strukturalny (na przykład powstanie nowej synapsy) i stanowią biologiczne podłoże pamięci oraz procesów uczenia się<sup>1</sup>. Neuroplastyczność, nazywana również plastycznością neuronalną, jest jednak cechą, która nadal nie została w pełni poznana i stanowi przedmiot licznych badań. Samo jej odkrycie było sprawą kontrowersyjną, ponieważ nie wpisywało się w uznane kanony neurologii. Potrzeba było czasu, aby koncepcja ta została przyjęta, nawet pomimo licznych świadectw empirycznych, potwierdzających jej słuszność. Nie był to jednak pierwszy taki przykład w historii badań nad układem nerwowym. Historia neuronauki jest bowiem pełna przejawów ciekawości i sceptycyzmu, konsensusów i sporów, a także wielkich odkryć empirycznych i rozważań teoretycznych.

### Zaczątki neuronauki w źródłach starożytnych

Układ nerwowy fascynował ludzi od dawna. Najwcześniejszym znanym ludzkości źródłem, opisującym struktury neuroanatomiczne, jest papirus pochodzący ze starożytnego Egiptu i datowany na przełom XVII-XVI wieku p.n.e. Odkryty przez Edwina Smitha papirus zawiera opisy szwów czaszki, opon mózgowo-rdzeniowych, powierzchni mózgu oraz płynu mózgowo-rdzeniowego, a także ciśnienia wewnątrzczaszkowego. Autorzy papirusu dostrzegają związek pomiędzy uszkodzeniami ośrodkowego układu nerwowego a zaburzeniami czynnościowymi niektórych narządów, na przykład tetraplegią, priapizmem, czy inkontynencją. Zasadniczą zaletą wspomnianego zwoju jest jego naukowość. Papirus Edwina Smitha jest jednym z czterech staroegipskich traktatów medycznych, które zachowały się do naszych czasów, jednak w odróżnieniu od trzech pozostałych, dokument ten w sposób racjonalny i naukowy opisuje określone przypadki medyczne, opisując ich warstwę materialną<sup>2</sup>. Wiele wieków później, na przełomie VI i V wieku p.n.e., właściwościami układu nerwowego zainteresował się Alkmeon z Krotony, starogrecki filozof oraz me-

---

<sup>1</sup> B. Bagrowski, *Strukturalna dynamika neuronów, jako podstawa neuroplastyczności rozwojowej*, [w:] *Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce: Część V – Nauki medyczne i nauki o zdrowiu*, (red.) J. Nyćkowiak, J. Leśny, Poznań 2020, s. 7–12; M. Kossut, *Neuroplastyczność*, Warszawa 2020.

<sup>2</sup> R.H. Wilkins, *Neurosurgical Classic XVII: Edwin Smith Surgical Papyrus*, "Neurosurgical Classics" 1964, s. 240-244.

dyk, określany mianem jednego z największych neuronaukowców wszechczasów<sup>3</sup>. Alkmeon był pierwszym uczonym, który potraktował mózg jako centralny ośrodek zmysłowy – uważał, że wrażenia sensoryczne ulegają zmieszaniu w mózgu. Do tych wniosków doprowadziły go sekcyjne badania neuroanatomiczne. Sekcja oka, badanie nerwu wzrokowego oraz innych zmysłów (z wyjątkiem zmysłu dotyku), których dokonał Alkmeon, przyczyniły się do ustalenia połączeń mózgu z narządami zmysłów oraz nakreślenia przebiegu nerwów wzrokowych. W XI wieku n.e. Awicenna, perski lekarz i filozof, również podkreślał, że mózg jest ośrodkiem wrażeń zmysłowych, jednak zauważał też jego silne powiązanie z intelektem<sup>4</sup>. Alkmeon podkreślał również, że zdrowie organizmu jest zależne od równowagi przeciwieństw, później nazwanej homeostazą<sup>5</sup>. Aktualne badania naukowe także wskazują na istotny związek pomiędzy funkcjami układu nerwowego a mechanizmami homeostatycznymi<sup>6</sup>.

Na przełomie V i IV wieku p.n.e., Hipokrates z Kos, grecki lekarz, określany mianem ojca medycyny, odkrył, że uszkodzenie mózgu wywołuje objawy po przeciwnej stronie ciała. Jego odkrycie przyczyniło się do odkrycia układu piramidowego oraz zrozumienia, że drogi korowo-rdzeniowe mają charakter kontralateralny – ruch prawej strony ciała wynika z aktywności kory motorycznej w lewej półkuli, natomiast za ruch lewej strony ciała odpowiada kora motoryczna w prawej półkuli<sup>7</sup>. Hipokrates uważał ponadto mózg za ośrodek analizy świata zewnętrznego oraz świadomości, a także za ośrodek inteligencji i siły woli. Jego badania neurologiczne doprowadziły do lepszego zrozumienia epilepsji, a także stanowią jeden z najistotniejszych fundamentów współczesnej neurologii i neuronauki<sup>8</sup>.

Żyjący na przełomie IV i III wieku p.n.e. Arystoteles, jeden z najsłynniejszych greckich filozofów, zaproponował trzyczęściową strukturę psychiczną człowieka – w tym kontekście wyróżnił duszę wegetatywną, sensorywną oraz rozumną. Duszę wegetatywną człowiek miał dzielić ze zwierzętami i roślinami, duszę sensorywną tylko ze zwierzętami, natomiast dusza rozumna była przez Arystotelesa postrzegana jako charakterystyczna wyłącznie dla człowieka. W koncepcji Arystotelesa, dusza wegetatywna odpowiadała za podstawowe czynności życiowe (wzrost oraz odżywianie się), dusza sensorywna była odpowiedzialna za doświadczanie wrażeń zmysłowych oraz poruszanie się, natomiast dusza rozumna charakteryzowała się zdolnością do analizy

---

<sup>3</sup> A. Debernardi, E. Sala, G. D'Aliberti, G. Talamonti, A.F. Franchini, M. Collice, *Alcmaeon of Croton*, "Neurosurgery" 2010, nr 2, s. 247-252.

<sup>4</sup> E.B. Nader, *The Phenomenological Quest between Avicenna and Heidegger*, Binghamton 2000, s. 149-171; S.H. Nasr, O. Leaman, *History of Islamic Philosophy*, Routledge 1996, s. 315, 1022-1023.

<sup>5</sup> G.G. Celesia, *Alcmaeon of Croton's Observations on Health, Brain, Mind, and Soul*, "Journal of the History of the Neurosciences" 2012, nr 4, s. 409-426; N.H. Franco, *Animal Experiments in Biomedical Research: A Historical Perspective*, "Animals" 2013, nr 1, s. 238-273.

<sup>6</sup> R. Toni, *The Neuroendocrine System: Organization and Homeostatic Role*, "Journal of Endocrinological Investigation" 2004, Suppl. 6, s. 35-47; C.E. Flores, P. Méndez, *Shaping Inhibition: Activity Dependent Structural Plasticity of GABAergic Synapses*, "Frontiers in Cellular Neuroscience" 2014, nr 327.

<sup>7</sup> F. Rezende-Cunha, R. De Oliveira-Souza, *The Pyramidal Syndrome and the Pyramidal Tract: A Brief Historical Note*, "Arquivos de Neuro-psiquiatria" 2011, nr 5, s. 836-837.

<sup>8</sup> T. Breitenfeld, M.J. Jurasic, D. Breitenfeld, *Hippocrates: The Forefather of Neurology*, "Neurological Sciences" 2014, nr 9, s. 1349-1352.

intelektualnej oraz poznania rozumowego<sup>9</sup>. Koncepcja duszy jako struktury psychicznej człowieka oraz koncepcja jej dzielenia na trzy władze lub trzy aspekty była również przez kolejne wieki analizowana przez innych uczonych, takich jak Paweł z Tarsu (judeochrześcijański uczyony z I wieku n.e.)<sup>10</sup>, Augustyn z Hippony (chrześcijański filozof i teolog z IV-V wieku n.e.)<sup>11</sup>, Nemezjusz z Emesy (chrześcijański filozof z IV wieku n.e.)<sup>12</sup>, Awerroes (arabski filozof, teolog i lekarz z XII wieku n.e.)<sup>13</sup> czy Tomasz z Akwinu (chrześcijański filozof i teolog z XIII wieku n.e.)<sup>14</sup>. Również współcześni badacze często odnoszą się do koncepcji Arystotelesa jako do jednej z najistotniejszych w historii nauki<sup>15</sup>.

Nieoczywiste nawiązanie do arystotelesowskiego trójpodziału władz psychicznych przedstawił w XX w. Aleksandr Łurija, rosyjski psycholog, uważany za ojca neuropsychologii. Skupiał się on nie tyle na strukturze ośrodkowego układu nerwowego, co na jego funkcji i aktywnościach z nimi związanych. Wyróżnił trzy bloki funkcjonalne mózgu<sup>16</sup>:

- Blok I (energetyczny) – odpowiedzialny za regulację tonusu kory mózgowej i zapewnienie optymalnego stanu czuwania, niezbędnego do świadomego funkcjonowania; za funkcje Bloku I odpowiadają w znacznej mierze struktury podkorowe, odpowiedzialne za bazowe funkcjonowanie; w pewnym uproszczeniu Blok I może stanowić odpowiednik i poszerzenie koncepcji duszy wegetatywnej (zaznaczając, że bloki funkcjonalne mózgu nie mogłyby mieć odzwierciedlenia w świecie roślin).
- Blok II (informacyjny, przyjmujący) – odpowiedzialny za odbiór i syntezę wrażeń, integrowanie bodźców, przyjmowanie, przetwarzanie oraz przechowywanie informacji napływających ze świata zewnętrznego; za funkcje Bloku II odpowiadają w znacznej mierze struktury korowe związane z narządami zmysłów; w pewnym uproszczeniu Blok II może stanowić odpowiednik i poszerzenie koncepcji duszy sensorytywnej.
- Blok III (programujący, regulujący) – odpowiedzialny za kontrolę złożonych zachowań, regulację funkcji psychicznych oraz za operacje mentalne; za funkcje Bloku III odpowiada w szczególności kora przedczołowa związana ze świadomością.

<sup>9</sup> C. Shields, *Aristotle's Psychology* [w:] *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, (red.) E. Zalta, 2016; A.M. Leroi, *The Lagoon: How Aristotle Invented Science*, Bloomsbury 2015, s. 156-163.

<sup>10</sup> J. Gnilka, *Paweł z Tarsu*, Kraków 2009, s. 291-299.

<sup>11</sup> Augustyn z Hippony, *O wolnej woli*, rozdział III.

<sup>12</sup> R.W. Sharples, *Nemesius of Emesa and Some Theories of Divine Providence*, "Vigiliae Christianae" 1983, s. 141-156.

<sup>13</sup> P. Adamson, *Philosophy in the Islamic World: A History of Philosophy without Any Gaps*, Oxford 2016, s. 188-191.

<sup>14</sup> Tomasz z Akwinu, *Suma teologiczna*, rozdział I.

<sup>15</sup> R.C. Douglas, *Located in Space: Plato's Theory of Psychic Motion*, "Ancient Philosophy" 2022, nr 2, s. 419-442.

<sup>16</sup> A.R. Łurija, *Podstawy neuropsychologii*, Warszawa 1976; J. Wyszomirska, A. Daniel-Sielańczyk, „Chcę być szczerą. Czy to coś złego?” *Studium przypadku z psychologii klinicznej – neuropsychologii. Przykład do egzaminu państwowego*, „Psychiatria i Psychologia Kliniczna” 2022, nr 2, s. 134-144.

mą aktywnością funkcji poznawczych, w szczególności kontroli poznawczej; w pewnym uproszczeniu Blok III może stanowić odpowiednik i poszerzenie koncepcji duszy rozumnej.

Z punktu widzenia współczesnej neuronauki poznawczej, warto nawiązać do poglądów Arystotelesa dotyczących pamięci. Definiował on pamięć między innymi jako zdolność do przechowywania w umyśle spostrzeganych doświadczeń jako specyficznych obrazów mentalnych, które można odzyskać – zauważał wyraźne powiązanie pomiędzy percepcją a pamięcią. Arystoteles wierzył, że fizycznym podłożem pamięci są odciski powstające w ciele wskutek doświadczenia percepcyjnego, bez względu na to, jakiej modalności były to bodźce. Z pamięcią związane były jednak nie tylko wrażenia zmysłowe, ale również myślenie i inne operacje mentalne<sup>17</sup>. Proces wydobywania informacji z pamięci, Arystoteles tłumaczył jako ponowne stymulowanie wspomnień, aż wydobędzie się to, które jest oczekiwane. W tym kontekście przypominanie jest samokierowaną działalnością polegającą na odzyskiwaniu informacji odcisniętych w pamięci<sup>18</sup>.

W podobnym czasie, pomiędzy V a III wiekiem p.n.e., w rejonie Indii rozwijana była koncepcja samskary. Była ona definiowana w różnoraki sposób, jednak z punktu widzenia współczesnej neuronauki poznawczej jednym z najistotniejszych wyjaśnień samskary było to, że stanowi ona swoiste wrażenie mentalne, formację umysłową, wspomnienie, ślad psychologiczny lub wewnętrzny odcisk. Według różnych szkół filozofii indyjskiej, każde działanie lub zamiar jednostki pozostawia samskarę (rozumianą jako wrażenie, wpływ lub ślad) w głębszej strukturze umysłu człowieka, które później może się manifestować jako tendencje, nawyki i skłonności. Teoria samskary wyjaśnia, w jaki sposób i dlaczego ludzie pamiętają niektóre rzeczy oraz wyjaśnia wpływ, jaki mają wspomnienia na ludzkie życie<sup>19</sup>. Samskara była jedną z pierwotnych koncepcji powstawania śladów pamięciowych.

W czasach starożytnych żyli także inni uczeni, którzy interesowali się strukturą i funkcjonowaniem układu nerwowego oraz odnosili je do określonych funkcji psychicznych. Epikur z Samos (grecki filozof z IV-III wieku p.n.e.) zauważał istotne powiązanie pomiędzy percepcją zmysłową a życiem intelektualnym, co wskazuje na związek pomiędzy bazowymi procesami poznawczymi a wyższymi funkcjami poznawczymi. Herofilos z Chalcedonu (grecki lekarz z IV-III wieku p.n.e.), twórca aleksandryjskiej szkoły medycznej, prowadził badania neuroanatomiczne mózgu aby poznać naturę duszy. Herofilos odnosił się do koncepcji trzech dusz i wszystkie z nich lokalizował w komorach mózgu, a najważniejsza dusza kierująca była według niego zlokalizowana w czwartej komorze, ponieważ tam przechodziły nerwy ruchowe wychodzące do rdzenia kręgowego oraz nerwy czuciowe biegnące z rdzenia

---

<sup>17</sup> D. Bloch, *Aristotle on Memory and Recollection*, Leiden 2007.

<sup>18</sup> H.C. Warren, *A History of the Association of Psychology*, New York 1921, s. 25-30.

<sup>19</sup> J. Fowler, *Perspectives of Reality: An introduction to the Philosophy of Hinduism*, Sussex 2002, s. 105; S. Philips, *Epistemology in Classical India: The Knowledge Sources of the Nyaya School*, Routledge 2014, s. 134; D. Knipe, *Vedic Voices: Intimate Narratives of a Living Andhra Tradition*, Oxford 2015, s. 52.

kręgowego do mózgu. Wskazuje to na powiązanie pomiędzy spostrzeganiem a działaniem, co dziś jest określane mianem sensomotoryki. Podobne odkrycia przedstawił Erasistratos z Keos (grecki lekarz z IV-III wieku p.n.e.), który nie tylko wyróżnił nerwy czuciowe i ruchowe, ale także opisał zwoje mózgu, jak również wyróżnił mózg i móżdżek. Kilka wieków później, Galen z Pergamonu (rzymski lekarz i filozof z II wieku n.e.) starał się potwierdzić, że to mózg jest ośrodkiem poznania i percepcji, popierając ponownie encefalocentryczną koncepcję duszy. Poszerzał jednak znaczenie mózgu, przypisując mu takie funkcje jak wyobraźnia, pamięć, koncentracja, wiedza, myślenie, doświadczanie doznań zmysłowych oraz dobrowolny ruch<sup>20</sup>.

### Rozwój neuronauki w czasach nowożytnych

Po przełomowych odkryciach uczonych starożytnych, które w znacznej mierze dotyczyły neuroanatomii oraz zdolności poznania, nastąpił okres średniowiecza, który jednak nie był okresem stagnacji. W średniowieczu koncepcje starożytne były dalej rozwijane i wzbogacane, szczególnie przez uczonych chrześcijańskich i muzułmańskich, takich jak Awicenna, Awerroes czy Tomasz z Akwinu. Kolejne badania empiryczne dotyczące neuronauki pojawiły się jednak dopiero w czasach nowożytnych.

Z punktu widzenia neuroplastyczności, najistotniejszym odkryciem neuronaukowym z XVI w. jest wyodrębnienie hipokampa przez włoskiego lekarza – Realdo Colombo<sup>21</sup>. Hipokamp stanowi bowiem ośrodek pamięci długotrwałej i przestrzennej oraz uczestniczy w konsolidacji pamięci. W XVI w. nie było to jednak tak oczywiste, a tym bardziej nie kojarzono tego ze zmianami w układzie nerwowym. Kartezjusz, francuski fizyk i filozof, którego działalność była ważnym elementem filozofii XVII w., ponownie analizował związek struktur neuronalnych oraz zjawisk psychicznych. Choć był dualistą, to jednak jako jeden z pierwszych uczonych nowożytnych podkreślał wzajemny wpływ ciała i duszy, dając podstawę do rozważań biologicznych podstaw zjawisk percepcyjnych oraz emocji<sup>22</sup>. Również w XVII w. działał Marcello Malphigi, włoski lekarz i biolog, który przedstawił dokładne opisy rozmieszczenia ciał komórek nerwowych w mózgu<sup>23</sup>. W wieku XVIII swoje doświadczenia prowadził Luigi Galvani, włoski lekarz i fizjolog, który w toku badań odkrył elektryczną naturę układu nerwowego<sup>24</sup>. Odkrycie to zainicjowało gwałtow-

<sup>20</sup> R.J. Hankinson, *Galen's Anatomy of the Soul*, "Phronesis" 1991, nr 2, s. 197-233; A. Wills, *Herophilus, Erasistratus, and the Birth of Neuroscience*, "Lancet" 1999, nr 9191, s. 1719-1720; J. Vetulani, *Czy skalpelem można leczyć duszę? Czyli przyszłość psychiatrii z perspektywy biologa*, „Wszechświat” 2010, nr 1, s. 22-31.

<sup>21</sup> R.W. Gryglewski, *Początki badań nad neurofizjologią mózgu*, „Agencja Oceny Technologii Medycznych i Taryfikacji”, <https://tiny.pl/cs8nn>, (dostęp 15.12.2023).

<sup>22</sup> W. Tatarkiewicz, *Historia filozofii*, t. 2: *Filozofia nowożytna do roku 1830*, Warszawa 1981, s. 62.

<sup>23</sup> J.M.S. Pearce, *Malphigi and the Discovery of Capillaries*, "European Neurology" 2007, nr 4, s. 253-255.

<sup>24</sup> M. Piccolino, *Animal Electricity and the Birth of Electrophysiology: The Legacy of Luigi Galvani*, "Brain Research Bulletin" 1998, nr 5, s. 381-407.

ny wzrost zainteresowania fizjologią układu nerwowego, czego liczne przykłady były zauważalne szczególnie w XIX oraz XX w. Omawiając odkrycia neuronaukowe XVIII w. należy jednak wspomnieć o jednym z zapomnianych badaczy – Michele Vincenzo Malacarne. Był on włoskim anatomem oraz chirurgiem, który jako pierwszy zaobserwował zmiany plastyczne w układzie nerwowym. W swoich badaniach trenował zwierzęta, a następnie dokonywał ich sekcji porównawczych. Dzięki temu zaobserwował, że mózdzek trenowanych zwierząt był znacznie większy niż mózdzek zwierząt niewyszkolonych<sup>25</sup>. Z punktu widzenia dzisiejszej wiedzy na temat neuroplastyczności, Malacarne najprawdopodobniej zaobserwował w skali macro skutki rozgałęziania się sieci neuronalnych wskutek długotrwałego doświadczenia sensomotorycznego, jakim był trening zwierząt. To rozgałęzianie się sieci neuronalnych było możliwe dzięki stymulowaniu neuronów do tworzenia nowych synaps. Choć dzięki doświadczeniom Malacarne możliwe byłoby mówienie o neuroplastyczności już od 1793 r., to jednak jego odkrycia zostały w znacznej mierze zapomniane przez środowisko naukowe.

Z punktu widzenia neuronauki, wiek XIX był przede wszystkim stuleciem odkryć neurofizjologicznych. Gustav Theodor Fritsch (niemiecki anatom, fizjolog i antropolog) oraz Eduard Hitzig (niemiecki neurolog i psychiatra) zlokalizowali ośrodki lokomotoryczne i ostatecznie potwierdzili obserwację Hipokratesa o unerwieniu kontralateralnym, za które odpowiedzialne jest skrzyżowanie dróg piramidowych. Hipokrates opierał się jedynie na obserwacjach, natomiast Fritsch i Hitzig zastosowali podejście eksperymentalne – stymulowali korę motoryczną i zauważyli, że powoduje to ruch po przeciwnej stronie ciała. Odkrycie Fritscha i Hitziga jest nazywane jednym z kamieni milowych neuronauki<sup>26</sup>. W podobnym czasie Paul Broca (francuski chirurg i antropolog) oraz Carl Wernicke (niemiecki psychiatra i neurolog) zlokalizowali ośrodki mowy, których uszkodzenie powoduje afazję<sup>27</sup>. Był to kolejny przełomowy moment, który pokazał, że niektóre funkcje (na przykład mowa) mogą być rozproszone w więcej niż jednym ośrodku neuronalnym. W obecnym stanie wiedzy zauważa się, że funkcje związane z mową i językiem są jeszcze bardziej złożone niż wcześniej uważano<sup>28</sup>. William James, amerykański filozof i psycholog, uznawany za ojca amerykańskiej psychologii, pisał w 1890 r., że mózg i jego funkcje nie są stałe przez całe dorosłe życie. Zauważał, że ośrodkowy układ nerwowy jest podatny na zmiany, czyli plastyczny. Postrzegał struktury plastyczne jako wystarczająco słabe, aby poddać się wpływowi, a jednocześnie wystarczająco silne, aby nie poddać się

---

<sup>25</sup> M.R. Rosenzweig, *Aspects of the Search for Neural Mechanisms of Memory*, "Annual Review of Psychology" 1996, s. 1-32; A. Zanatta, C. Cherici, A. Bargoni, S. Buzzi, V. Cani, P. Mazzaello, F. Zampieri, *Vincenzo Malacarne (1744-1816) and the First Description of the Human Cerebellum*, "Cerebellum" 2018, nr 4, s. 461-464.

<sup>26</sup> M. Hagner, *The Electrical Excitability of the Brain: Toward the Emergence of an Experiment*, "Journal of the History of the Neurosciences" 2012, nr 3, s. 237-249

<sup>27</sup> G. Nasios, E. Dardiotis, L. Messinis, *From Broca and Wernicke to the Neuromodulation Era: Insights of Brain Language Networks for Neurorehabilitation*, "Behavioural Neurology" 2019, nr 9894571.

<sup>28</sup> P. Tremblay, A.S. Dick, *Broca and Wernicke Are Dead, Or Moving Past the Classic Model of Language Neurobiology*, "Brain and Language" 2016, s. 60-71.

wszystkim wpływom jednocześnie<sup>29</sup>. Mimo solidnych argumentów Jamesa, hipoteza neuroplastyczności nadal nie była akceptowana przez środowisko naukowe, podobnie jak miało to miejsce wiek wcześniej w przypadku Malacarne.

Przełom XIX i XX w. był naznaczony jednym z najistotniejszych sporów w historii neuronauki, który dotyczył struktury układu nerwowego. Santiago Ramón y Cajal (hiszpański histolog i neuroanatom) uważał, że układ nerwowy składa się z połączonych z sobą komórek, natomiast Camillo Golgi (włoski lekarz patolog) uważał, że układ nerwowy ma strukturę sieciową. Golgi, chcąc dowieść prawdziwości swojej tezy, opracował w 1873 r. metodę barwienia srebrem, aby ostatecznie potwierdzić, że układ nerwowy stanowi sieć. Metodę Golgiego wykorzystał jednak Cajal, który za jej pomocą w 1887 r. wykazał, że układ nerwowy u ptaków nie jest ciągły. Stanowiło to argument na rzecz hipotezy Cajala, że układ nerwowy składa się z połączonych z sobą komórek. Golgi oraz Cajal w 1906 r. otrzymali Nagrodę Nobla w dziedzinie medycyny i fizjologii za ich wspólne odkrycia – Golgi opracował metodę, którą Cajal wykorzystał w celu wykazania struktury układu nerwowego. Niemniej jednak w sporze koncepcyjnym zwyciężył Cajal, ponieważ to właśnie jego hipoteza okazała się prawdziwa<sup>30</sup>. Charles Scott Sherrington (angielski lekarz i fizjolog) również w 1906 r. wprowadził pojęcie synapsy na określenie połączenia pomiędzy neuronami. Zapoczątkował on także badania synaps oraz podał klasyfikację receptorów, tworząc w ten sposób współczesny język neurofizjologii<sup>31</sup>. Badania nad synapsami były naznaczone kolejnym istotnym sporem, dotyczącym zasad działania synaps – jedni badacze uważali, że synapsy mają naturę elektryczną, natomiast inni stali na stanowisku, że synapsy mają naturę chemiczną. Jednym z głównych obrońców koncepcji chemicznej natury synaps był Otto Loewi (austriacki farmakolog), natomiast po przeciwnej stronie sporu stał między innymi John Carew Eccles (australijski neurofizjolog). Choć za słuszością hipotezy elektrycznej natury synaps przemawiały choćby odkrycia Galvaniego z XVIII w., który wykazał elektryczną naturę układu nerwowego, to jednak Otto Loewi w 1921 r. wykazał, że przekaźnictwo nerwowe ma naturę chemiczną, odkrywając przy okazji acetylocholinę (którą nazywał wtedy *vagusstoff*)<sup>32</sup>. Późniejsze odkrycia z zakresu neurofizjologii wykazały jednak, że Eccles również miał rację, ponieważ istnieją także synapsy elektryczne. Po raz pierwszy takie synapsy zostały odkryte w 1957 r. u skorupiaka *Astacus fluviatilis*<sup>33</sup>, jednak później odkryto ich istnienie również u kręgowców<sup>34</sup>. Po wielu latach okazało się więc, że Ecclesowi należałoby zwrócić honor.

<sup>29</sup> W. James, *Chapter IV: Habits* [w:] *Principles of Psychology*, Dover 1890.

<sup>30</sup> J.A. de Carlos, J. Borrell, *A Historical Reflection on the Contributions of Cajal and Golgi to the Foundations of Neuroscience*, "Brain Research Reviews" 2007, nr 1, s. 8-16; E.G. Jones, *Golgi, Cajal and the Neuron Doctrine*, "Journal of the History of the Neurosciences" 1999, nr 2, s. 170-178.

<sup>31</sup> C.S. Sherrington, *The Integrative Action of the Nervous System*, Oxford 1906.

<sup>32</sup> N.C. Spitzer, *Synaptic Transmission Makes History*, "Nature Neuroscience" 2005, nr 1415; E.S. Valenstein, *The Discovery of Chemical Neurotransmitters*, "Brain and Cognition" 2002, nr 1, s. 73-95.

<sup>33</sup> E.J. Furshpan, D.D. Potter, *Mechanism of Nerve-Impulse Transmission at Crayfish Synapse*, "Nature" 1957, s. 342-343.

<sup>34</sup> P. Dale, G.J. Augustine, D. Fitzpatrick, W.C. Hall, A.S. LaMantia, J.O. McNamara, L.E. White, *Neuroscience*, Sunderland 2008, s. 85-88.



Współczesne odkrycia wskazują jednak, że honor należałoby zwrócić również Golgiemu. Przez prawie 120 lat uważano, że koncepcja Cajala ma zastosowanie w każdym układzie nerwowym – to znaczy, że każdy układ nerwowy występujący w przyrodzie składa się z neuronów połączonych synapsami. W kwietniu 2023 r. okazało się jednak, że w niektórych przypadkach prawdziwa okazuje się koncepcja Golgiego. Badania przeprowadzone na żebroplawach (morskich bezkręgowcach, stanowiących jedną z najwcześniej odgałęzionych linii ewolucyjnych w królestwie zwierząt) wykazały, że ich układ nerwowy nie zawiera synaps, ale stanowi wielojądrowy neuron przypominający swoją strukturą *syncytium* podobne do sieci. Wnioski płynące z przytoczonego badania wskazują na konieczność znalezienia alternatywnych perspektyw neuroprzekaznictwa oraz organizacji sieci neuronalnych, aby zbadać, czy informacje w takim układzie nerwowym nie ulegają sprzęgnięciom oraz czy możliwe jest wyodrębnianie określonych obwodów funkcjonalnych<sup>35</sup>. Badanie to jasno jednak wskazuje, że neuronauka charakteryzuje się dynamiką oraz nieustannie stawia przed badaczami nowe wyzwania.

### Badania nad neuroplastycznością w XX wieku

Mimo prób Malacarne pod koniec XVIII w. oraz Jamesa pod koniec XIX w., hipoteza neuroplastyczności nie była przyjmowana przez środowisko naukowe. Dopiero w 1904 r. zostało wprowadzone do neuronauki pojęcie engramu, nazywanego również śladem pamięciowym, które stanowiło pomost pomiędzy neurofizjologią a starożytnymi koncepcjami śladów odciskanych w umyśle. Pojęcia „engram” jako pierwszy użył Richard Semon, niemiecki zoolog i biolog ewolucyjny, aby opisać neuronalne podłoże przechowywania oraz przywoływania wspomnień – w ten sposób pojęcie „ślad pamięciowy” nie było już jedynie filozoficzną koncepcją, ale wkroczyło w ramy biologii<sup>36</sup>.

Kolejne lata charakteryzowały się intensyfikacją badań empirycznych dotyczących neuroplastyczności. Shepherd Ivory Franz (amerykański fizjolog) w 1916 r. prowadził badania nad substytucją funkcjonalną i zauważał, że jeśli jedna ścieżka zostanie zablokowana, istnieje możliwość użycia innej dzięki plastyczności, ponieważ nieuszkodzone obszary mogą przejmować funkcję obszarów uszkodzonych<sup>37</sup>. Justo Gonzalo (hiszpański neuronaukowiec), zauważał, że centralna masa korowa jest masą manewrową, która posiada zdolność do zwiększania pobudliwości neuronalnej za pomocą właściwości, jaką jest plastyczność<sup>38</sup>.

---

<sup>35</sup> P. Burkhardt, J. Colgren, A. Medhus, L. Digel, B. Naumann, J.J. Soto-Angel, E.L. Nordmann, M.Y. Sachkova, M. Kittelmann, *Syncytial Nerve Net in a Ctenophore Adds Insights on the Evolution of Nervous Systems*, "Science" 2023, nr 6642, s. 293-297.

<sup>36</sup> H. Förstl, *Richard Semon (1859-1918): Expeditionen, Engramme und Epigenetik*, "Neuropsychiatrie" 2023, nr s. 147-155S; A. Josselyn, S. Köhler, P.W. Frankland, *Heroes of the Engram*, "The Journal of Neuroscience" 2017, nr 18, s. 4647-4657.

<sup>37</sup> V. A. Colotla, P. Bach-y-Rita, *Shepherd Ivory Franz: His Contributions to Neuropsychology and Rehabilitation*, "Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience" 2002, nr 2, s. 141-148.

<sup>38</sup> J. Gonzalo Rodríguez-Leal, I. Gonzalo Fonrodona, *Brain Dynamics: The Brain Activity According to the Dynamic Conditions of Nervous Excitability*. t. 1, Madrid 2021.

Pierwszą osobą, która użyła terminu „plastyczność neuronalna” był Jerzy Konorski, polski neurofizjolog i neuropsycholog, który w 1948 r. pojęcie to odniósł do sytuacji, w których następowały trwałe przekształcenia w układach neuronów. Przekształcenia te nazwał zmianami plastycznymi<sup>39</sup>. W 1949 r. koncepcję plastyczności neuronalnej rozwijał Donald Hebb, kanadyjski psycholog, który podkreślał współzależność pobudliwości oraz plastyczności. Twierdził bowiem, że warunkiem koniecznym do wystąpienia zmian w połączeniach komórek nerwowych jest odpowiednio silne pobudzenie neuronu – zauważał, że w przypadku pojawienia się potencjału czynnościowego, połączenie pomiędzy komórkami staje się mocniejsze<sup>40</sup>.

W 1964 roku, Marian Diamond (amerykańska profesor neuroanatomii) przeprowadziła badanie podobne do eksperymentów Malacarne. Badała ona bowiem trenowane szczury i zaobserwowała, że charakteryzowały się one większą masą kory mózgowej (zwłaszcza wzrokowej oraz somatosensorycznej) niż szczury nietrenowane, co wskazuje na strukturalne zmiany neuroplastyczne. Diamond zauważyła jednak także zwiększone wydzielanie acetylocholinoesterazy u trenowanych szczurów, co wskazuje na intensyfikację neurotransmisji w synapsach nerwowo-mięśniowych wskutek motorycznego uczenia się<sup>41</sup>. W 1969 r. Geoffrey Raisman (brytyjski neuronaukowiec) przedstawił zdjęcia z mikroskopu elektronowego, ukazujące powstawanie nowych synaps w rejonie formacji hipokampa<sup>42</sup>. Stanowiło to ostateczne potwierdzenie plastyczności neuronalnej na poziomie pojedynczych synaps. W tym samym roku Paul Bach-y-Rita, amerykański neuronaukowiec, poszukiwał sposobów, jak można wykorzystać neuroplastyczność w praktyce klinicznej, a swoje rozważania skupił w szczególności wokół osób z dysfunkcjami narządów zmysłów. W tym celu zaproponował koncepcję substytucji sensorycznej, w której założył, że ośrodki korowe odpowiedzialne za uszkodzone zmysły mogą odpowiadać za interpretowanie bodźców o innych modalnościach. Jednym z koronnych przykładów substytucji sensorycznej jest czytanie za pomocą alfabetu Braille’a, w którym aktywowana jest kora wzrokowa, choć czytanie odbywa się za pomocą receptorów dotyku<sup>43</sup>. Bach-y-Rita, chcąc pomóc osobom niewidomym, zaprojektował specjalne krzesło, które pozwalało widzieć obrazy za pomocą receptorów dotykowych. W późniejszym czasie opracował też urządzenie dla pacjentów z uszkodzonym układem przedsionkowym, które również wykorzystywało sub-

---

<sup>39</sup> R.B. Livingston, *Brain Mechanisms in Conditioning and Learning*, “Neurosciences Research Program Bulletin” 1966, nr 3, s. 349-354; J.E. LeDoux, *Synaptic Self: How Our Brains Become Who We Are*, New York 2002, s. 137

<sup>40</sup> R.E. Brown, P.M. Milner, *The Legacy of Donald O. Hebb: More than the Hebb Synapse*, “Nature Reviews Neuroscience” 2003, nr 12, s. 1013-1019; G. Berlucchi, H.A. Buchtel, *Neuronal Plasticity: Historical Roots and Evolution of Meaning*, “Experimental Brain Research” 2009, nr 3, s. 307-319.

<sup>41</sup> M.C. Diamond, D. Krech, M.R. Rosenzweig, *The Effects of an Enriched Environment on the Histology of the Rat Cerebral Cortex*, “The Journal of Comparative Neurology” 1964, s. 111-120; E.L. Bennett, M.C. Diamond, D. Krech, M.R. Rosenzweig, *Chemical and Anatomical Plasticity of Brain*, “Science” 1964, nr 3644, s. 610-619.

<sup>42</sup> J. Fawcett, *Geoffrey Raisman. 28 June 1939 – 27 January 2017*, “Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society” 2018, s. 341-355.

<sup>43</sup> N. Sadato, A. Pascual-Leone, J. Grafman, V. Ibañez, M.P. Deiber, G. Dold, M. Hallett, *Activation of the Primary Visual Cortex by Braille Reading in Blind Subjects*, “Nature” 1996, nr 6574, s. 526-528.

stytucję sensoryczną. Urządzenie to składało się z grupy akcelerometrów, komputera oraz płytki umieszczonej na języku, która stymulowała różne obszary języka w zależności od orientacji akcelerometrów, co mimo dysfunkcji przedsionkowej, pozwalało na generowanie reakcji nastawczych. Zagęszczenie receptorów na języku stanowiło istotny element, dzięki któremu urządzenie mogło działać bardzo precyzyjnie<sup>44</sup>. Oba opracowane urządzenia wymagały jednak od użytkowników długotrwałego treningu sensorycznego w celu przetworzenia nowych szlaków neuronalnych. Bazując na odkryciach Bach-y-Rity, w XXI w. opracowano urządzenie, znane pod nazwą *BrainPort*, które pozwala osobom niewidomym „widzieć za pomocą języka”. *BrainPort* konwertuje bowiem obraz na szereg punktów stymulacyjnych oraz punktów bez stymulacji, dzięki czemu możliwe jest spostrzeganie obrazów za pomocą bodźców odbieranych przez język<sup>45</sup>.

Neuroplastyczność w XX w. oraz na przełomie XX i XXI w. stała się więc nie tylko koncepcją teoretyczną, nie tylko procesem obserwowanym w laboratorium, ale przede wszystkim mechanizmem, który może być wykorzystany w praktyce, aby pomóc osobom z określonymi dysfunkcjami.

### Współczesne ujęcie neuroplastyczności

Początek XXI w. był dla neuronauki przede wszystkim czasem gruntowania wcześniej zdobytej wiedzy oraz udoskonalania aparatu pojęciowego w naukach o układzie nerwowym. W 2004 r., Michael Merzenich (amerykański neuronaukowiec), na podstawie swoich wcześniejszych badań<sup>46</sup>, podkreślał znaczenie neuroplastyczności. Zauważał, że sieci neuronalne nie są czymś stałym, ale ulegają dynamicznym zmianom. Podkreślał również, że dzięki neuroplastyczności odpowiednio ukierunkowane oddziaływania terapeutyczne mogą prowadzić do radykalnej poprawy w funkcjonowaniu poznawczym, nawet u osób starszych. Wyróżniał jednak dwa odmienne okresy plastyczności mózgu: okres krytyczny (mający miejsce w dzieciństwie) oraz okres plastyczności u dorosłych<sup>47</sup>. Neuroplastyczność osób dorosłych polega przede wszystkim na plastyczności synaptycznej, w obrębie której zachodzą

---

<sup>44</sup> P. Bach-y-Rita, *Sensory Plasticity*, "Acta Neurologica Scandinavica" 1967, nr 4, s. 417-426; P. Bach-y-Rita, C.C. Collins, F.A., Saunders, B. White, L. Scadden, *Vision Substitution by Tactile Image Projection*, "Nature" 1969, nr 5184, s. 963-964; N. Doidge, *The Brain That Changes Itself: Stories of Personal Triumph from the Frontiers of Brain Science*, New York 2007.

<sup>45</sup> A.C. Nau, C. Pintar, A. Arnoldussen, C. Fisher, *Acquisition of Visual Perception in Blind Adults Using the BrainPort Artificial Vision Device*, "American Journal of Occupational Therapy" 2015, nr 1, 6901290010p1-p8.

<sup>46</sup> M.M. Merzenich, W.M. Jenkins, *Cortical Plasticity, Learning, and learning Dysfunction*, "Maturation Windows and Adult Cortical Plasticity" 1995, s. 247-271; M.M. Merzenich, W.M. Jenkins, P. Johnston, C. Schreiner, S.L. Miller, P. Tallal, *Temporal Processing Deficits of Language-learning Impaired Children Ameliorated by Training*, "Science" 1996, nr 5245, s. 77-81.

<sup>47</sup> N. Doidge, *The Brain That Changes Itself: Stories of Personal Triumph from the Frontiers of Brain Science*, New York 2007; M.M. Merzenich, T.M. Van Vleet, M. Nahum, *Brain Plasticity-based Therapeutics*, "Frontiers in Human Neuroscience" 2014, nr 385.

dwa rodzaje zmian: zmiany funkcjonalne (zmiana siły transmisji synaptycznej) oraz zmiany strukturalne (synaptogeneza – powstawanie nowych synaps). Neuroplastyczność okresu dziecięcego, nazywana również neuroplastycznością rozwojową, opiera się przede wszystkim na mechanizmie strukturalnej dynamiki neuronów. Mechanizm ten wynika z dynamicznego kształtowania się układu nerwowego we wczesnym wieku dziecięcym (szczególnie do 2. roku życia) i wiąże się z wysokim potencjałem neuroplastycznym dziecka. Intensywna neuroplastyczność rozwojowa umożliwia dynamiczne zmiany funkcjonalne u dzieci, związane z sekwencyjnością, wariantowością oraz ciągłością rozwoju psychomotorycznego<sup>48</sup>. Umożliwia też powrót do pełnej sprawności psychomotorycznej po tak inwazyjnych zabiegach jak usunięcie jednej półkuli mózgu<sup>49</sup>, ale również wiąże się z intensywniejszym zapamiętywaniem wydarzeń traumatycznych oraz stresujących we wczesnym dzieciństwie, co może odzwierciedlać się w poziomie zdrowia psychicznego również w znacznie późniejszych etapach życia<sup>50</sup>.

Aktualne podziały systematyczne neuroplastyczności zawierają znacznie więcej jej rodzajów. Podziały te nie są jednak jednolite, ale w niemal wszystkich podkreśla się znaczenie neuroplastyczności w określonym okresie życia lub określonej dziedzinie życia. Neuroplastyczność odpowiada bowiem nie tylko za rozwój psychomotoryczny, zapamiętywanie nowych informacji czy substytucję sensoryczną, ale również za uczenie się nowych umiejętności, powrót do sprawności po uszkodzeniach układu nerwowego, a także rehabilitację funkcji poznawczych czy kompensację funkcjonalne utraconych umiejętności. Neuroplastyczność odgrywa więc istotną rolę w niemal każdej dziedzinie życia<sup>51</sup>. Każda dziedzina, a zatem również każdy typ neuroplastyczności, wiąże się jednak z określonymi uwarunkowaniami oraz regułami. W dziedzinie neurorehabilitacji wykazano na przykład, że do wytworzenia się zmian neuroplastycznych potrzeba okresu przynajmniej jednego tygodnia regularnej stymulacji<sup>52</sup>. Jednym z przełomowych odkryć w zakresie neuroplastyczności, było odkrycie, że neurogeneza, czyli powstawanie nowych neuronów, może występować nawet u osób dorosłych,

---

<sup>48</sup> B. Bagrowski, dz. cyt., s. 7-12.

<sup>49</sup> J.R. Villablanca, D.A. Hovda, *Developmental Neuroplasticity in a Model of Cerebral Hemispherectomy and Stroke*, "Neuroscience" 2000, nr 3, s. 625-637; L.Q. Uddin, *Stability and Plasticity of Functional Brain Networks after Hemispherectomy: Implications for Consciousness Research*, "Quantitative Imaging in Medicine and Surgery" 2020, nr 6, s. 1408-1412.

<sup>50</sup> E. Crouch, E. Radcliff, M. Brown, P. Hung, *Exploring the Association between Parenting Stress and a Child's Exposure to Adverse Childhood Experiences (ACEs)*, "Children and Youth Services Review" 2019, s. 186-192; B. Cho, B. Woods-Jaeger, J.L. Borelli, *Parenting Stress Moderates the Relation between Parental Trauma Exposure and Child Anxiety Symptoms*, "Child Psychiatry & Human Development" 2021, nr 6, s. 1050-1059.

<sup>51</sup> J. Dorszewska, *Neurogeneza i plastyczność synaptyczna ośrodkowego układu nerwowego* [w:] W. Kozubski, J. Dorszewska, *Apoptoza w chorobach ośrodkowego układu nerwowego*, Lublin 2008, s. 45-64; M. Kossut, *Neuroplastyczność – podstawowe mechanizmy*, „Neuropsychiatria i Neuropsychologia” 2019, nr 1-2, s. 1-8.

<sup>52</sup> S.M. Landi, F. Baguear, V. Della-Maggiore, *One Week of Motor Adaptation Induces Structural Changes in Primary Motor Cortex That Predict Long-Term Memory One Year Later*, "The Journal of Neuroscience" 2011, nr 33, s. 11808-11813.

ale jedynie w rejonie opuszki węchowej oraz zakrętu zębatego hipokampa<sup>53</sup>. Choć nie jest ona tak rozległa i intensywna jak u dziecka, to jednak stanowi istotne uzupełnienie synaptogenezy oraz procesów plastyczności funkcjonalnej.

Obecnie zwraca się uwagę, że neuroplastyczność odpowiada nie tylko za uczenie się, powrót do sprawności czy holistyczny rozwój psychomotoryczny, ale również może mieć wymiar patofizjologiczny. W tym kontekście zwraca się uwagę na neuroplastyczność uzależnieniową oraz neuroplastyczność patologiczną. W neuroplastyczności uzależnieniowej wzmacniane są połączenia w ośrodkach podkorowych odpowiedzialnych za mechanizm nagrody, a osłabiane są połączenia w ośrodkach korowych odpowiedzialnych za kontrolowanie zachowania oraz autokontrolę poznawczą<sup>54</sup>. Przykładem neuroplastyczności patologicznej jest nieprawidłowa transmisja synaptyczna glutaminianu oraz kwasu  $\gamma$ -aminomasłowego, która przyczynia się do hamowania korowego oraz dysfunkcyjnej łączności wewnętrzkorowej, co stwarza warunki do patofizjologii schizofrenii<sup>55</sup>. Zwraca się jednak uwagę, że neuroplastyczność patologiczna może mieć również znaczenie w patofizjologii zaburzeń neurorozwojowych ze spektrum autyzmu<sup>56</sup>.

Współczesna neuronauka prezentuje również teorie wyjaśniające procesy neuroplastyczności. Jednym z głównych mechanizmów neurofizjologicznych stojących za powstawaniem nowych synaps w ośrodkowym układzie nerwowym jest długotrwałe wzmocnienie synaptyczne (*Long-Term Potentiation*). W układach glutaminianergicznych, stymulacja prowadzi do wydzielenia glutaminianu, który następnie wiąże się z receptorami AMPA (receptory dla kwasu  $\alpha$ -amino-3-hydroksy-5-metylo-4-izoksazolo-propionowego) oraz NMDA (receptory dla kwasu N-metylo-D-asparaginowego) i poprzez zainicjowanie dokomórkowego prądu sodowego prowadzi do depolaryzacji błony komórkowej neuronu postsynaptycznego. Wskutek wspomnianych procesów dochodzi do dysocjacji jonu  $Mg^{2+}$  z miejsca wiążącego w kanale receptora NMDA, co pozwala na wnikanie jonów  $Ca^{2+}$  do wnętrza komórki postsynaptycznej. Prowadzi to do inicjacji szlaków sygnałowych oraz biosyntezy i aktywacji kinaz (głównie kinaz zależnych od wapnia i kalmoduliny), co w dalszej perspektywie wpływa na potranslacyjne modyfikacje białek odpowiedzialnych za przebieg transmisji

---

<sup>53</sup> A. Kumar, V. Pareek, M.A. Faiq, S.K. Ghosh, C. Kumari, *Adult Neurogenesis in Humans: A Review of Basic Concepts, History, Current Research, and Clinical Implications*, "Innovations in Clinical Neuroscience" 2019, nr 5-6, s. 30-37.

<sup>54</sup> P. Sampedro-Piquero, L.J. Santín, E. Castilla-Ortega, *Aberrant Brain Neuroplasticity and Function in Drug Addiction: A Focus on Learning-Related Brain Regions* [w:] S. Palermo, R. Morese, *Behavioral Neuroscience*, "IntechOpen" 2018.

<sup>55</sup> A. Bhandari, D. Voineskos, Z.J. Daskalakis, T.K. Rajji, D.M. Blumberger, *A Review of Impaired Neuroplasticity in Schizophrenia Investigated with Non-invasive Brain Stimulation*, "Frontiers in Psychiatry" 2016, nr 45.

<sup>56</sup> L.M. Oberman, A. Rotenberg, A. Pascual-Leone, *Aberrant Brain Plasticity in Autism Spectrum Disorders* [w:] *Cognitive Plasticity in Neurologic Disorders*, Oxford 2014; H. Kądziała-Olech, *Objawy autyzmu, zespołu nadpobudliwości psychoruchowej z deficytem uwagi oraz innych zaburzeń neurorozwojowych jako przejaw zaburzonej neuroplastyczności*, „Psychiatria i Psychologia Kliniczna” 2014, nr 2, s. 112-115; A.A. Anashkina, E.I. Erlykina, *Molecular Mechanisms of Aberrant Neuroplasticity in Autism Spectrum Disorders (Review)*, "Modern Technologies in Medicine" 2021, nr 1, s. 78-91

synaptycznej. Dzięki temu możliwe jest podtrzymywanie wzmocnienia synaptycznego, które jest podstawą powstawania kolców dendrytycznych, czyli uwypukleń błony komórkowej dendrytów, pozwalających na zmianę siły synapsy lub powstawanie nowych połączeń synaptycznych<sup>57</sup>. Jednym z ważnych modulatorów neuroplastyczności jest neurotroficzne białko BDNF (*Brain-Derived Neurotrophic Factor*), które aktywuje w neuronach wewnątrzkomórkowe sieci sygnałowe<sup>58</sup>.

Zrozumienie, jakie białka biorą udział w procesach neuroplastyczności, pozwoliło na rozwój neurogenetyki, która pozwala nie tylko na poszukiwanie molekularnego podłoża chorób neurologicznych, ale może mieć również znaczenie w planowaniu procesu rehabilitacji oraz predykcji postępów terapii. Jednym z przykładów jest białko BDNF, które jest kodowane przez gen *BDNF*. Wykazano bowiem, że polimorfizm Val66Met genu *BDNF* ma związek z efektywnością neurorehabilitacji – postępy rehabilitacji istotnie się różniły w zależności od genotypu pacjenta<sup>59</sup>. Odkrywanie kolejnych takich zależności może doprowadzić do personalizacji programów terapeutycznych w oparciu o uwarunkowania genetyczne pacjenta. W kontekście praktycznego wykorzystania neurogenetyki zwraca się bowiem uwagę nie tylko na polimorfizmy genu *BDNF*, ale również na inne warianty genetyczne, które bezpośrednio lub pośrednio są związane z neuroplastycznością oraz poprawą funkcjonalną<sup>60</sup>.

### Podsumowanie

Historia neuronauki jest bogata w odkrycia empiryczne oraz teoretyczne. Każde z odkryć dotyczących struktury lub funkcji układu nerwowego stanowiło istotny wkład w rozwój tej dziedziny wiedzy. Liczne rozważania teoretyczne, analizy sekcyjne, obserwacje behawioralne oraz badania laboratoryjne przyczyniły się do powstania koncepcji neuroplastyczności, a następnie do podejmowania prób jej empirycznego potwierdzenia. Warto podkreślić również polski akcent w historii neuroplastyczności, jakim było pierwsze użycie terminu „plastyczność neuronalna” przez Jerzego Konorskiego, polskiego neurofizjologa i neuropsychologa. Choć przez długi czas środowisko naukowe było sceptyczne względem idei neuroplastyczności, to jednak po jej definitywnym potwierdzeniu za pomocą mikroskopu elektronowego nastąpił gwałtowny rozwój badań w dziedzinie neuroplastyczności, również w kontekście jej praktycznego wykorzystania. Aktualnie zwraca się uwagę, że neuroplastyczność towarzyszy człowiekowi w każdym etapie życia oraz niemal w każdej dziedzinie życia, dzięki

---

<sup>57</sup> A. Shakesby, *Stress and Long-term Potentiation*, Dublin 2010; P. Borys, *LTP I LTD: Długotrwałe wzmocnienie synaptyczne i osłabienie synaptyczne*, Gliwice 2011.

<sup>58</sup> S. Bathina, U.N. Das, *Brain-derived Neurotrophic Factor and its Clinical Implications*, „Archives of Medical Science” 2015, nr 6, s. 1164-1178.

<sup>59</sup> B. Bagrowski, M. Czapracka, J. Kraśny, M. Prendecki, J. Dorszewska, M. Józwiak, *Assessment of the Relationship between Val66met BDNF Polymorphism and the Effectiveness of Gait Rehabilitation in Children and Adolescents with Cerebral Palsy*, „Acta Neurobiologiae Experimentalis” 2022, nr 1, s. 1-11.

<sup>60</sup> B. Bagrowski, *Perspectives for the Application of Neurogenetic Research in Programming Neurorehabilitation*, „Molecular Aspects of Medicine” 2023, nr 101149.

czemu kładzie się nacisk nie tylko na lepsze zrozumienie procesów neuroplastycznych, ale również na praktyczne ich wykorzystanie w codziennym życiu oraz w diagnostyce i terapii. Zrozumienie molekularnych mechanizmów neuroplastyczności doprowadziło również do rozwoju neurogenetyki, która w dalszej perspektywie może stanowić ważny element medycyny spersonalizowanej opartej na zindywidualizowanych protokołach terapii. Wyjaśnienie genetycznego podłoża neuroplastyczności oraz procesów jej towarzyszących może również przyczynić się do wykorzystania tej wiedzy w kontekście terapii genowej, szczególnie w przypadku chorób neurologicznych, jednak aktualnie jest to jedynie potencjalna perspektywa. Warto zaznaczyć, że choć neuroplastyczność jest procesem nadal poznawanym, to jednak stanowi jedno z centralnych zagadnień we współczesnej neuronauce.

## Bibliografia

- Adamson P., *Philosophy in the Islamic World: A History of Philosophy without Any Gaps*, Oxford 2016.
- Anashkina A.A., Erlykina E.I., *Molecular Mechanisms of Aberrant Neuroplasticity in Autism Spectrum Disorders (Review)*, "Modern Technologies in Medicine" 2021, nr 1, s. 78-91.
- Augustyn z Hippony, *O wolnej woli*.
- Bach-y-Rita P., Collins C.C., Saunders F.A., White B., Scadden L., *Vision Substitution by Tactile Image Projection*, "Nature" 1969, nr 5184, s. 963-964.
- Bach-y-Rita P., *Sensory Plasticity*, "Acta Neurologica Scandinavica" 1967, nr 4, s. 417-426.
- Bagrowski B., Czapracka, M. Kraśny J., Prendecki M., Dorszewska J., Jóźwiak M., *Assessment of the Relationship between Val66met BDNF Polymorphism and the Effectiveness of Gait Rehabilitation in Children and Adolescents with Cerebral Palsy*, "Acta Neurobiologiae Experimentalis" 2022, nr 1, s. 1-11.
- Bagrowski B., *Perspectives for the Application of Neurogenetic Research in Programming Neurorehabilitation*, "Molecular Aspects of Medicine" 2023, nr 101149.
- Bagrowski B., *Strukturalna dynamika neuronów, jako podstawa neuroplastyczności rozwojowej [w:] Badania i rozwój młodych naukowców w Polsce: Część V – Nauki medyczne i nauki o zdrowiu*, (red.) J. Nyckowiak, J. Leśny, Poznań 2020, s. 7-12.
- Bathina S., Das U.N., *Brain-derived Neurotrophic Factor and its Clinical Implications*, "Archives of Medical Science" 2015, nr 6, s. 1164-1178.
- Bennett E.L., Diamond M.C., Krech D., Rosenzweig M.R., *Chemical and Anatomical Plasticity of Brain*, "Science" 1964, nr 3644, s. 610-619.
- Berlucchi G., Buchtel H.A., *Neuronal Plasticity: Historical Roots and Evolution of Meaning*, "Experimental Brain Research" 2009, nr 3, s. 307-319.
- Bhandari A., Voineskos D., Daskalakis Z.J. Rajji T.K., Blumberger D.M., *A Review of Impaired Neuroplasticity in Schizophrenia Investigated with Non-invasive Brain Stimulation*, "Frontiers in Psychiatry" 2016, nr 45.
- Bloch D., *Aristotle on Memory and Recollection*, Leiden 2007.
- Borys P., *LTP i LTD: Długotrwałe wzmocnienie synaptyczne i osłabienie synaptyczne*, Gliwice 2011.
- Brown R.E., Milner P.M., *The Legacy of Donald O. Hebb: More than the Hebb Synapse*, "Nature Reviews Neuroscience" 2003, nr 12, s. 1013-1019.
- Breitenfeld T., Jurasic M.J., Breitenfeld D., *Hippocrates: The Forefather of Neurology*, "Neurological Sciences" 2014, nr 9, s. 1349-1352.
- Burkhardt P., Colgren J., Medhus A., Digel L., Naumann B., Soto-Angel J.J., Nordmann E.L., Sachkova M.Y., Kittelmann M., *Syncytial Nerve Net in a Ctenophore Adds Insights on the Evolution of Nervous Systems*, "Science" 2023, nr 6642, s. 293-297.
- Celesia G.G., *Alcmaeon of Croton's Observations on Health, Brain, Mind, and Soul*, "Journal of the History of the Neurosciences" 2012, nr 4, s. 409-426.

- Cho B., Woods-Jaeger B., Borelli J.L., *Parenting Stress Moderates the Relation between Parental Trauma Exposure and Child Anxiety Symptoms*, "Child Psychiatry & Human Development" 2021, nr 6, s. 1050-1059.
- Colotta V.A., Bach-y-Rita P., *Shepherd Ivory Franz: His Contributions to Neuropsychology and Rehabilitation*, "Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience" 2002, nr 2, s. 141-148.
- Crouch E., Radcliff E., Brown M., Hung P., *Exploring the Association between Parenting Stress and a Child's Exposure to Adverse Childhood Experiences (ACEs)*, "Children and Youth Services Review" 2019, s. 186-192.
- Dale P., Augustine G.J., Fitzpatrick D., Hall W.C., LaMantia A.S., McNamara J.O., White L.E., *Neuroscience*, Sunderland 2008.
- Debernardi A., Sala E., D'Aliberti G., Talamonti G., Franchini A.F., Collice M., *Alcmaeon of Croton*, "Neurosurgery" 2010, nr 2, s. 247-252.
- De Carlos J.A., Borrell J., *A Historical Reflection of the Contributions of Cajal and Golgi to the Foundations of Neuroscience*, "Brain Research Reviews" 2007, nr 1, s. 8-16.
- Diamond M.C., Krech D., Rosenzweig M.R., *The Effects of an Enriched Environment on the Histology of the Rat Cerebral Cortex*, "The Journal of Comparative Neurology" 1964, s. 111-120.
- Doidge N., *The Brain that Changes Itself: Stories of Personal Triumph from the Frontiers of Brain Science*, New York 2007.
- Dorszewska J., *Neurogeneza i plastyczność synaptyczna ośrodkowego układu nerwowego*, [w:] W. Kozubski, J. Dorszewska, *Apoptoza w chorobach ośrodkowego układu nerwowego*, Lublin 2008, s. 45-64.
- Douglas R.C., *Located in Space: Plato's Theory of Psychic Motion*, "Ancient Philosophy" 2022, nr 2, s. 419-442.
- Fawcett J., *Geoffrey Raisman. 28 June 1939 – 27 January 2017*, "Biographical Memoirs of Fellows of the Royal Society" 2018, s. 341-355.
- Flores C.E., Méndez P., *Shaping Inhibition: Activity Dependent Structural Plasticity of GABAergic Synapses*, "Frontiers in Cellular Neuroscience" 2014, nr 327.
- Fowler J., *Perspectives of Reality: An introduction to the Philosophy of Hinduism*, Sussex 2002.
- Franco N.H., *Animal Experiments in Biomedical Research: A Historical Perspective*, "Animals" 2013, nr 1, s. 238-273.
- Förstl H., *Richard Semon (1859-1918): Expeditionen, Engramme und Epigenetik*, "Neuropsychiatrie" 2023, nr 3, s. 147-155.
- Furshpan E.J., Potter D.D., *Mechanism of Nerve-Impulse Transmission at Crayfish Synapse*, "Nature" 1957, s. 342-343.
- Gnilka J., *Paweł z Tarsu*, Kraków 2009.
- Gonzalo Rodríguez-Leal J., Gonzalo Fonrodona I., *Brain Dynamics: The Brain Activity According to the Dynamic Conditions of Nervous Excitability*. t. 1, Madrid 2021.
- Gryglewski R.W., *Początki badań nad neurofizjologią mózgu*, „Agencja Oceny technologii Medycznych i Taryfikacji”, <https://tiny.pl/cs8nn> [dostęp 15 XII 2023].
- Hagner M., *The Electrical Excitability of the Brain: Toward the Emergence of an Experiment*, "Journal of the History of the Neurosciences" 2012, nr 3, s. 237-249.
- Hankinson R.J., *Galen's Anatomy of the Soul*, "Phronesis" 1991, nr 2, s. 197-233.
- James W., *Chapter IV: Habits* [w:] *Principles of Psychology*, Dover 1890.
- Jones E.G., *Golgi, Cajal and the Neuron Doctrine*, „Journal of the History of the Neurosciences" 1999, nr 2, s. 170-178.
- Josselyn S.A., Köhler S., Frankland P.W., *Heroes of the Engram*, "The Journal of Neuroscience" 2017, nr 18, s. 4647-4657.
- Kądziela-Olech H., *Objawy autyzmu, zespołu nadpobudliwości psychoruchowej z deficytem uwagi oraz innych zaburzeń neurorozwojowych jako przejaw zaburzonej neuroplastyczności*, „Psychiatria i Psychologia Kliniczna" 2014, nr 2, s. 112-115.
- Knipe D., *Vedic Voices: Intimate Narratives of a Living Andhra Tradition*, Oxford 2015.
- Kossut M., *Neuroplastyczność – podstawowe mechanizmy*, „Neuropsychiatria i Neuropsychologia" 2019, nr 1-2, s. 1-8.
- Kossut M., *Neuroplastyczność*, Warszawa 2020.
- Kumar A., Pareek V., Faiq M.A., Ghosh S.K., Kumari C., *Adult Neurogenesis in Humans: A Review of Basic Concepts, History, Current Research, and Clinical Implications*, "Innovations in Clinical Neuroscience" 2019, nr 5-6, s. 30-37.



- Landi S.M., Baguear F., Della-Maggiore V., *One Week of Motor Adaptation Induces Structural Changes in Primary Motor Cortex That Predict Long-Term Memory One Year Later*, "The Journal of Neuroscience" 2011, nr 33, s. 11808-11813.
- LeDoux J.E., *Synaptic Self: How Our Brains Become Who We Are*, New York 2002.
- Leroi A.M., *The Lagoon: How Aristotle Invented Science*, Bloomsbury 2015, s. 156-163.
- Livingston R.B., *Brain Mechanisms in Conditioning and Learning*, "Neurosciences Research Program Bulletin" 1966, nr 3, s. 349-354.
- Lurija A.R., *Podstawy neuropsychologii*, Warszawa 1976.
- Merzenich M.M., Jenkins W.M., *Cortical Plasticity, Learning, and learning Dysfunction*, "Maturational Windows and Adult Cortical Plasticity" 1995, s. 247-271.
- Merzenich M.M., Jenkins W.M., Johnston P., Schreiner C., Miller S.L., Tallal P., *Temporal Processing Deficits of Language-learning Impaired Children Ameliorated by Training*, "Science" 1996, nr 5245, s. 77-81.
- Merzenich M.M., Van Vleet T.M., Nahum M., *Brain Plasticity-based Therapeutics*, "Frontiers in Human Neuroscience" 2014, nr 385.
- Nader E.B., *The Phenomenological Quest between Avicenna and Heidegger*, Binghamton 2000.
- Nasios G., Dardiotis E., Messinis L., *From Broca and Wernicke to the Neuromodulation Era: Insights of Brain Language Networks for Neurorehabilitation*, "Behavioural Neurology" 2019, nr 9894571.
- Nasr S.H., Leaman O., *History of Islamic Philosophy*, Routledge 1996.
- Nau A.C., Pintar C., Arnoldussen A., Fisher C., *Acquisition of Visual Perception in Blind Adults Using the BrainPort Artificial Vision Device*, "American Journal of Occupational Therapy" 2015, nr 1, 6901290010p1-p8.
- Oberman L.M., Rotenberg A., Pascual-Leone A., *Aberrant Brain Plasticity in Autism Spectrum Disorders [w:] Cognitive Plasticity in Neurologic Disorders*, Oxford 2014.
- Philips S., *Epistemology in Classical India: The Knowledge Sources of the Nyaya School*, Routledge 2014.
- Piccolino M., *Animal Electricity and the Birth of Electrophysiology: The Legacy of Luigi Galvani*, "Brain Research Bulletin" 1998, nr 5, s. 381-407.
- Rezende-Cunha F., De Oliveira-Souza R., *The Pyramidal Syndrome and the Pyramidal Tract: A Brief Historical Note*, "Arquivos de Neuro-psiquiatria" 2011, nr 5, s. 836-837.
- Rosenzweig M.R., *Aspects of the Search for Neural Mechanisms of Memory*, "Annual Review of Psychology" 1996, s. 1-32.
- Sadato N., Pascual-Leone A., Grafman J., Ibañez V., Deiber M.P., Dold G., Hallett M., *Activation of the Primary Visual Cortex by Braille Reading in Blind Subjects*, "Nature" 1996, nr 6574, s. 526-528.
- Sampedro-Piquero P., Santín L.J., Castilla-Ortega E., *Aberrant Brain Neuroplasticity and Function in Drug Addiction: A Focus on Learning-Related Brain Regions [w:] S. Palermo, R. Morese, Behavioral Neuroscience*, "IntechOpen" 2018.
- Shakesby A., *Stress and Long-term Potentiation*, Dublin 2010.
- Sharples R.W., *Nemesius of Emesa and Some Theories of Divine Providence*, "Vigiliae Christianae" 1983, s. 141-156.
- Sherrington C.S., *The Integrative Action of the Nervous System*, Oxford 1906.
- Shields C., *Aristotle's Psychology* [w:] Stanford Encyclopedia of Philosophy (red.) E. Zalta, 2016.
- Spitzer N.C., *Synaptic Transmission Makes History*, "Nature Neuroscience" 2005, nr 1415.
- Tatarkiewicz W., *Historia filozofii*, t. 2: *Filozofia nowożytna do roku 1830*, Warszawa 1981.
- Tomasz z Akwinu, *Suma teologiczna*.
- Toni R., *The Neuroendocrine System: Organization and Homeostatic Role*, "Journal of Endocrinological Investigation" 2004, Suppl. 6, s. 35-47.
- Tremblay P., Dick A.S., *Broca and Wernicke Are Dead, or Moving Past the Classic Model of Language Neurobiology*, "Brain and Language" 2016, s. 60-71.
- Uddin L.Q., *Stability and Plasticity of Functional Brain Networks after Hemispherectomy: Implications for Consciousness Research*, "Quantitative Imaging in Medicine and Surgery" 2020, nr 6, s. 1408-1412.
- Valenstein E.S., *The Discovery of Chemical Neurotransmitters*, "Brain and Cognition" 2002, nr 1, s. 73-95.
- Vetulani J., *Czy skalpelem można leczyć duszę? Czyli przyszłość psychiatrii z perspektywy biologa*, „Wszeczeńświat” 2010, nr 1, s. 22-31.
- Villablanca J.R., Hovda D.A., *Developmental Neuroplasticity in a Model of Cerebral Hemispherectomy and Stroke*, "Neuroscience" 2000, nr 3, s. 625-637.
- Warren H.C., *A History of the Association of Psychology*, New York 1921.

- Wilkins R.H., *Neurosurgical Classic XVII: Edwin Smith Surgical Papyrus*, "Neurosurgical Classics" 1964, s. 240-244.
- Wills A., *Herophilus, Erasistratus, and the Birth of Neuroscience*, "Lancet" 1999, nr 9191, s. 1719-1720.
- Wyszomirska J., Daniel-Sielańczyk A., „Chcę być szczerą. Czy to coś złego?” *Studium przypadku z psychologii klinicznej – neuropsychologii. Przykład do egzaminu państwowego*, „Psychiatria i Psychologia Kliniczna” 2022, nr 2, s. 134-144.
- Zanatta A., Cherici C., Bargoni A., Buzzi S., Cani V., Mazzarello P., Zampieri F., *Vincenzo Malacarne (1744-1816) and the First Description of the Human Cerebellum*, "Cerebellum" 2018, nr 4, s. 461-464.