Biologia engramu: od materialnego śladu pamięci do konstrukcji przyszłości w świetle badań Steve'a Ramireza

AUTOR

Fundacja Dobre Państwo

STRESZCZENIE / ABSTRACT

Artykuł analizuje ewolucję rozumienia pamięci: od filozoficznych metafor woskowych tabliczek po współczesną neuronaukę. Kluczowym punktem jest przejście od postrzegania pamięci jako statycznego archiwum do dynamicznego procesu biologicznego. Autor przywołuje koncepcję engramu Richarda Wolfganga Semona, definiując go jako trwałą modyfikację organizmu powstałą pod wpływem bodźca, oraz proces ekphory, czyli reaktywacji tego śladu. Tekst podkreśla znaczenie doktryny neuronowej Cajala w przełamaniu sieciowego modelu Golgiego, co otworzyło drogę do poszukiwań fizycznego nośnika wspomnień. Całość ukazuje pamięć jako plastyczny mechanizm biologiczny, który nie tylko przechowuje przeszłość, ale pozwala organizmowi adaptować się do zmieniającego się środowiska poprzez materialne zmiany w strukturze neuronalnej.

The article analyzes the evolution of the understanding of memory: from philosophical metaphors of wax tablets to modern neuroscience. A key point is the transition from perceiving memory as a static archive to a dynamic biological process. The author invokes Richard Wolfgang Semon's concept of the engram, defining it as a permanent modification of the organism resulting from a stimulus, and the process of ekphory, which is the reactivation of this trace. The text emphasizes the importance of Cajal's neuron doctrine in overcoming Golgi's reticular model, which paved the way for the search for the physical carrier of memories. Overall, it presents memory as a plastic biological mechanism that not only stores the past but allows the organism to adapt to a changing environment through material changes in neuronal structure.

Artykuł analizuje ewolucję rozumienia pamięci – od archaicznych metafor „woskowych tabliczek” i statycznych archiwów, aż po współczesną koncepcję engramu jako dynamicznego procesu biologicznego. Autor dowodzi, że przełom w neuronauce, symbolizowany przez badania nad optogenetyką (m.in. prace Ramireza i Tonegawy), pozwolił przejść od pasywnej obserwacji do aktywnego sterowania śladami pamięciowymi. Główna teza tekstu głosi, że pamięć nie służy wiernemu odtwarzaniu przeszłości, lecz jest plastycznym narzędziem adaptacyjnym. Jej fundamentalną funkcją ewolucyjną jest rekombinowanie fragmentów dawnych doświadczeń w celu konstruowania symulacji i predykcji przyszłych zdarzeń. Tym samym granica między pamięcią a wyobraźnią zaciera się, a oba procesy okazują się korzystać z tych samych mechanizmów neuronalnych. Tekst wskazuje, że zdolność do modyfikacji engramów otwiera nie tylko nowe możliwości terapeutyczne, ale stawia fundamentalne pytania neuroetyczne o granice ingerencji w autobiograficzną ciągłość osoby i jej sposób projektowania przyszłości.

SŁOWA KLUCZOWE

biologia engramu | materialny ślad pamięci | optogenetyka | komórki engramowe | plastyczność neuronalna | konsolidacja pamięci | ekphory | zespoły komórkowe Hebba | zakręt zębaty hipokampa | episodic future thinking | model predykcyjny osoby | neuroetyka manipulacji pamięcią | aktywnościowo zależne znakowanie neuronów | ontologia procesualna pamięci

Pamięć jako materialny ślad w organizmie

Od śladu pamięci do engramu: jak doświadczenie stało się przedmiotem biologii eksperymentalnej

Pamięć należy do tych właściwości człowieka, które przez większą część dziejów myśli pozostawały jednocześnie najbardziej oczywiste w doświadczeniu potocznym i najbardziej nieuchwytne poznawczo. Wiemy przecież, że pamiętamy – potrafimy rozpoznać twarz, odnaleźć drogę, przywołać smak dzieciństwa, zrekonstruować rozmowę czy opowiedzieć własną biografię, wyciągając wnioski z minionych wydarzeń.

Zarazem przez tysiąclecia nie potrafiliśmy wskazać, co właściwie pozostaje w organizmie po ustaniu zdarzenia. Przedmiot znika, dźwięk cichnie, spotkanie dobiega końca, człowiek odchodzi, a przecież coś z minionej sytuacji trwa i może po godzinach, latach lub dziesięcioleciach zostać ponownie przywołane przez układ nerwowy. Pamięć stanowi więc osobliwy problem ontologiczny: doświadczenie jest zdarzeniem chwilowym, natomiast jego skutki mogą trwać znacznie dłużej niż czas oddziaływania bodźca. Nauka o pamięci musiała zatem odpowiedzieć na pytanie, w jaki sposób przemijające zdarzenie pozostawia w organizmie trwałą, materialną konsekwencję.

Dawne metafory próbowały oswoić ten paradoks, zanim możliwe stało się jego eksperymentalne badanie. W platońskim **Teajtecie** pojawia się obraz woskowej tabliczki, na której doświadczenia odciskają swoje znaki; Arystoteles w traktacie **O pamięci i przypominaniu** wiązał pamięć z zachowaniem reprezentacji tego, co nie jest już bezpośrednio obecne. Obrazy odcisku, pieczęci, zapisu, skarbca czy archiwum powracały w kulturze europejskiej przez kolejne stulecia.

Choć ich poznawcza produktywność była ogromna, zawierały one założenie, które współczesna neuronauka musiała skorygować: sugerowały, że pamięć polega na zachowaniu względnie nieruchomej kopii przeszłego zdarzenia. Tymczasem okazuje się, że organizm nie przechowuje przeszłości tak, jak archiwum dokumentów. Nie istnieje neuronalna fotografia dzieciństwa ani wierna taśma rejestrująca zdarzenia.

Pamięć jest procesem biologicznym; musi jednocześnie zachowywać informację i pozostawać na tyle plastyczna, by móc wykorzystać ją w zmieniającym się świecie. Dopiero rozwój biologii komórki, fizjologii układu nerwowego i doktryny neuronowej pozwolił przeformułować pytanie filozoficzne na pytanie eksperymentalne.

Spór Camilla Golgiego i Santiago Ramóna y Cajala nie dotyczył pamięci bezpośrednio, lecz miał kluczowe znaczenie dla jej późniejszego badania. Golgi interpretował układ nerwowy jako strukturę sieciową i ciągłą; Cajal natomiast – wykorzystując paradoksalnie metodę barwienia opracowaną przez swojego antagonistę – rozwijał doktrynę neuronową, według której układ nerwowy składa się z odrębnych komórek pozostających w relacjach funkcjonalnych. Wraz z umacnianiem się komórkowej koncepcji mózgu pojawiła się możliwość postawienia pytania, którego tradycje filozoficzne nie mogły rozstrzygnąć empirycznie: jeśli doświadczenie pozostawia fizyczny ślad, to w których komórkach, połączeniach lub wzorcach aktywności należy go szukać i jakie zmiany odróżniają tkankę, która „pamięta”, od tej samej tkanki sprzed doświadczenia.

Od postulatu materialnego śladu do krytyki naiwnego lokalizacjonizmu

W tym miejscu do historii neuronauki wchodzi Richard Wolfgang Semon. Niemiecki zoolog, kształcony w duchu ewolucjonizmu Ernsta Haeckla, wprowadził w 1904 roku pojęcie **engramu** jako trwałej, choć potencjalnie utajonej modyfikacji organizmu powstałej pod wpływem bodźca. Semon nie dysponował aparaturą pozwalającą zidentyfikować materialny substrat postulowanego śladu, więc jego teoria pozostawała w połowie programem badawczym, a w połowie koncepcją biologiczno-filozoficzną. Jej zasadnicza intuicja okazała się jednak zdumiewająco trwała: doświadczenie powinno powodować długotrwałą zmianę w układzie biologicznym, którą odpowiednie wskazówki mogą później reaktywować i ujawnić w zachowaniu. Semon określał proces wydobywania takiego śladu terminem **ecphory**.

Współczesna literatura przedmiotu nadal rekonstruuje jego program właśnie w tych kategoriach: doświadczenie tworzy trwałą reprezentację biologiczną, która może pozostawać nieaktywna, by później zostać ponownie wzbudzona przez odpowiednie sygnały. Znaczenie Semona polega zatem nie na „odkryciu komórek pamięci" – czego uczynić nie mógł – lecz na zmianie sposobu postawienia problemu. Pamięć przestała być traktowana wyłącznie jako własność abstrakcyjnej duszy, subiektywna funkcja świadomości czy metaforyczny zapis; stała się zjawiskiem wymagającym fizycznego nośnika. Tym samym rozpoczęło się poszukiwanie mechanizmu łączącego zdarzenie psychologiczne z trwałą zmianą biologiczną. Autor książki trafnie wskazuje na tę historyczną ciągłość: droga od Semona do współczesnych zespołów komórek engramowych to przejście od postulowania materialnego śladu do możliwości jego eksperymentalnego oznaczania, reaktywowania i modyfikowania.

Historia ta nie rozwijała się jednak liniowo. Karl Lashley przez dziesięciolecia próbował odnaleźć lokalizację pamięci, usuwając różne fragmenty kory mózgowej u szczurów uczonych poruszania się w labiryntach. Nie znalazł jednak miejsca, które można by uznać za prosty magazyn konkretnego wyuczonego zachowania. Wyniki prowadziły go ku zasadzie działania masowego i ekwipotencjalności: skutki uszkodzeń zależały często bardziej od wielkości usuniętej tkanki niż od precyzyjnego położenia lezji. W perspektywie historycznej nie był to dowód na brak materialnego śladu pamięci, lecz ostrzeżenie przed zbyt naiwnym lokalizacjonizmem. Lashley szukał engramu narzędziami o rozdzielczości całych fragmentów mózgu, podczas gdy późniejsza neuronauka odkryła, że właściwą jednostką analizy są selektywne zespoły komórek, ich synapsy, relacje między obszarami oraz dynamiczne konfiguracje aktywności. Współczesny sukces badań engramowych nie

unieważnia więc porażki Lashleya, lecz tłumaczy, dlaczego jego eksperymenty nie mogły doprowadzić do zamierzonego celu.

Pamięć jako dynamiczna właściwość sieci neuronalnych

Drugą istotną linię rozwojową wyznaczył Donald Hebb. W książce **The Organization of Behavior** z 1949 roku sformułował koncepcję zespołów komórkowych (**cell assemblies**) oraz ideę plastyczności zależnej od współaktywacji neuronów. Późniejsze, popularne streszczenie „neurons that fire together wire together" upraszcza jego stanowisko, lecz zachowuje zasadniczą intuicję: doświadczenie może zmieniać siłę powiązań między elementami sieci, dzięki czemu wzorzec aktywności staje się łatwiejszy do ponownego odtworzenia. Hebb przesunął problem z pytania „gdzie znajduje się pamięć?" ku pytaniu „jak zmienia się sieć, gdy organizm się uczy?". To przesunięcie okazało się kluczowe.

Pamięć nie musiała zatem znajdować się w pojedynczym neuronie ani nawet w jednym regionie mózgu; mogła być własnością organizacji zespołu komórek oraz zmian zachodzących w ich połączeniach. Współczesne badania nad engramami w istotnej mierze połączyły intuicję Semona o trwałym śladzie z hebbowską ideą plastycznej populacji neuronów. Rozwój wiedzy o wzmocnieniu synaptycznym i konsolidacji stopniowo wypełniał lukę pomiędzy zachowaniem a molekularnym substratem uczenia. Nie należy jednak konstruować z tej historii prostej opowieści triumfalnej, w której każda dekada przybliżała naukę do jednego ostatecznego „miejsca pamięci".

Współczesna wiedza wskazuje raczej, że różne rodzaje pamięci angażują odmienne, choć współpracujące systemy; reprezentacje zmieniają się w czasie, konsolidacja może reorganizować udział poszczególnych struktur, a ślad pamięciowy posiada wymiar komórkowy, synaptyczny i sieciowy. Pojęcie engramu zachowało użyteczność właśnie dlatego, że uwolniono je od nazbyt dosłownego utożsamienia ze statycznym obiektem. Dzisiejszy engram jest bardziej procesem utrzymywania informacji przez zmieniający się system niż neurologicznym odpowiednikiem kamiennej tablicy. Nawet sformułowanie „komórki engramowe" wymaga ostrożności. Komórka uczestnicząca w kodowaniu określonego doświadczenia nie zawiera w sobie kompletnego wspomnienia na podobieństwo pliku zapisanego na dysku. Wspomnienie wyłania się z aktywności zespołów neuronalnych, relacji synaptycznych i współpracy wielu struktur. W badaniach nad pamięcią kontekstową szczególną rolę odgrywa hipokamp (w tym zakręt zębaty), lecz emocjonalna ekspresja lęku angażuje również ciało migdałowate, podczas gdy długoterminowa reorganizacja pamięci obejmuje szerokie sieci korowe. Współczesne przeglądy podkreślają ponadto, że engram

zmienia się w cyklu życia pamięci – od kodowania i konsolidacji po wydobywanie i zapominanie – a granice między komórkami „engramowymi" a pozostałymi nie są ontologicznie niezmienne. To rozróżnienie ma znaczenie większe niż tylko terminologiczne.

Jeżeli pamięć nie jest rzeczą umieszczoną w neuronie, lecz dynamiczną własnością sieci, pytanie o możliwość jej manipulacji musi być postawione precyzyjnie. Można zmienić prawdopodobieństwo reaktywacji zespołu, siłę jego połączeń, dostępność śladu czy walencję emocjonalną, nie wykonując przy tym operacji typu „otwórz plik – popraw treść – zapisz". Już na poziomie definicji widać, dlaczego język „edycji pamięci" jest jednocześnie użyteczny i mylący. Pozwala uchwycić przełom sprawstwa eksperymentalnego, ale może sugerować precyzję kontroli, której obecna neuronauka nie posiada. Przez większość XX wieku podstawowy problem badań nad pamięcią dotyczył związku konieczności: co stanie się z zachowaniem, jeżeli określony obszar mózgu, receptor czy populacja neuronów zostaną uszkodzone lub zahamowane. Jest to logika badań **loss-of-function**.

Jeśli zniszczenie hipokampa uniemożliwia tworzenie określonych wspomnień, można wnioskować, że struktura ta uczestniczy w procesie pamięciowym. Jeśli zablokowanie mechanizmu plastyczności zaburza konsolidację, jest on prawdopodobnie dla niej konieczny. Takie eksperymenty nie odpowiadają jednak na pytanie odwrotne: czy sztuczne uruchomienie określonej populacji komórek wystarczy, aby wywołać behawioralną ekspresję konkretnej pamięci?

Optogenetyka jako narzędzie dowodzenia wystarczalności engramu

Rozróżnienie między koniecznością a wystarczalnością stanowi fundament metodologii wyjaśnień przyczynowych. Neurobiologia musiała przejść od prostego wyłączania elementów systemu do umiejętności aktywowania dokładnie tych komponentów, których funkcję pragnęła zrozumieć. W tym punkcie optogenetyka dokonała przełomu w epistemologii neuronauki. Jej istotą jest synteza metod genetycznych i optycznych, która pozwala uczynić wybrane komórki wrażliwymi na światło, a następnie kontrolować ich aktywność z wysoką rozdzielczością czasową. Rozwój mikrobiologicznych opsyn, w szczególności kanałorodopsyn, pozwolił przekształcić foton w eksperymentalne polecenie skierowane do konkretnej populacji neuronów. Karl Deisseroth definiował optogenetykę jako technologię umożliwiającą sterowanie zdefiniowanymi zdarzeniami biologicznymi w określonych komórkach z szybkością właściwą dla funkcjonowania układu nerwowego.

Doniosłość tej metody nie sprowadzała się zatem do samego użycia „lasera w mózgu”. Po raz pierwszy możliwe stało się badanie relacji przyczynowej między aktywnością precyzyjnie zdefiniowanego zespołu komórek a konkretnym zachowaniem. W badaniach nad pamięcią technologia ta została sprzężona z drugim kluczowym narzędziem: możliwością aktywnościowo zależnego znakowania neuronów uczestniczących w danym doświadczeniu. Wykorzystując fakt, że geny takie jak **c-Fos** ulegają ekspresji w silnie aktywowanych neuronach, można użyć ich regulatorów jako biologicznych znaczników komórek kodujących zdarzenie. Połączenie tego znakowania z systemami regulowanej ekspresji genów, wektorami wirusowymi oraz światłoczułymi opsynami otworzyło drogę do scenariusza niemal fantastycznego: można było zidentyfikować komórki aktywne podczas uczenia, nadać im selektywną wrażliwość na światło, a następnie – w innym czasie i kontekście – ponownie wzbudzić tę konkretną populację.

Autor książki wskazuje na laboratorium Susumu Tonegawy w MIT oraz współpracę Xu Liu i Steve'a Ramireza jako moment przejścia od badań nad lokalizacją pamięci do eksperymentalnego sprawstwa wobec engramu. W eksperymencie opublikowanym w **Nature** w 2012 roku zespół ten znakował komórki zakrętu zębatego hipokampa, aktywowane podczas warunkowania lękowego, poprzez ekspresję kanałorodopsyny-2. Gdy zwierzę znajdowało się później w odmiennym kontekście, optogenetyczna reaktywacja tej populacji wywoływała nasilenie zachowania **freezing**, czego nie obserwowano w grupach kontrolnych. Dzięki temu badacze mogli sformułować znacznie silniejszą tezę niż w przypadku klasycznych badań lezyjnych: aktywacja specyficznego, rzadkiego zespołu komórek uczestniczących w kodowaniu doświadczenia była wystarczająca do wywołania behawioralnej ekspresji powiązanej pamięci lękowej. Waga tego odkrycia wymaga jednak precyzyjnego określenia, co dokładnie zostało dowiedzione.

Engram jako dynamiczny proces a nie statyczny zapis

Nie wykazano, że całe wspomnienie mieści się w kilku komórkach zakrętu zębatego. Nie udowodniono również, że światło odtworzyło w mózgu myszy pełną fenomenologiczną kopię wcześniejszego przeżycia – badacz nie ma bowiem bezpośredniego dostępu do subiektywnego doświadczenia zwierzęcia. Mierzono zachowanie, przede wszystkim freezing, i kontrolowano eksperymentalnie związek między aktywnością oznaczonego zespołu neuronów a tą reakcją. Sami autorzy podkreślali różnicę między wykazaniem wystarczalności populacji DG do ekspresji określonej odpowiedzi a twierdzeniem, że ta sama populacja jest jedynym koniecznym nośnikiem całej pamięci. Hipokamp posiada równoległe drogi przetwarzania, a pamięć kontekstowa stanowi element szerszego układu.

Ta metodologiczna ostrożność nie osłabia eksperymentu; przeciwnie – precyzuje skalę jego osiągnięcia. Po 2012 roku samo pojęcie engramu wymagało ponownego doprecyzowania. Tradycyjna intuicja nakazywała postrzegać go jako stabilny zbiór komórek przechowujących informację. Współczesne prace kreślą jednak subtelniejszy obraz: doświadczenie selekcjonuje określone zespoły neuronów, ich własna pobudliwość wpływa na prawdopodobieństwo włączenia do engramu, uczenie modyfikuje połączenia synaptyczne, a późniejsza reaktywacja wspiera konsolidację. Reprezentacja może podlegać reorganizacji, zachowując przy tym funkcjonalną ciągłość pamięci. Co więcej, różne wspomnienia mogą częściowo współdzielić komórki engramowe, jeśli są kodowane w bliskim odstępie czasu, co pozwala biologicznej architekturze engramów uczestniczyć w tworzeniu powiązań między zdarzeniami. Najnowsze modele uwzględniają jednocześnie poziom somatyczny, dendrytyczny i synaptyczny; ta sama komórka może bowiem uczestniczyć w więcej niż jednym śladzie, podczas gdy ich odrębność podtrzymują odmienne konfiguracje połączeń.

Powstaje tu interesujący paradoks. Nauka zdołała wskazać materialne komponenty pamięci właśnie wtedy, gdy musiała zrezygnować z nadziei, że materialność oznacza prostotę i statyczność. Engram jest fizyczny, lecz nie jest nieruchomym przedmiotem. Można go eksperymentalnie reaktywować, ale nie stanowi on samodzielnej miniatury całego przeżycia. Może być względnie trwały, choć jego elementy, połączenia i relacje z innymi układami ulegają zmianie. Pamięć okazuje się biologicznie realna właśnie jako proces zdolny do zachowywania informacji pomimo zmienności własnego materialnego wykonania. Historia engramu prowadzi zatem od naiwnego materializmu, który chciałby wskazać "miejsce wspomnienia", ku znacznie dojrzalszej ontologii procesualnej: doświadczenie pozostawia w mózgu konsekwencje materialne, lecz informacja jest własnością organizacji, relacji i dynamiki tych konsekwencji. Ta procesualność ma kluczowe znaczenie dla całej dalszej argumentacji.

Gdyby pamięć była nieruchomą kopią przeszłości, jej biologiczna modyfikacja sprowadzałaby się do problemu konserwacji lub destrukcji archiwum. Jeżeli jednak pamięć jest dynamiczną strukturą, która musi być ponownie uruchamiana, rekonstruowana, konsolidowana i integrowana z nowym kontekstem, to plastyczność nie jest przypadkową niedoskonałością systemu, lecz częścią jego funkcjonalności. Możliwość zmiany wspomnienia jawi się wówczas nie jako technologiczny wyjątek narzucony mózgowi z zewnątrz, lecz jako radykalne wykorzystanie własnej biologicznej właściwości pamięci. Laboratorium nie wynajduje zatem plastyczności engramu; uczy się przejmować kontrolę nad procesami, które układ nerwowy wykorzystuje naturalnie. Równie istotny jest drugi wniosek.

Zdolność do eksperymentalnej manipulacji engramem nie oznacza jeszcze pełnego zrozumienia pamięci. W literaturze przedmiotu nawet entuzjastyczni badacze podkreślali, że nie odnaleziono

"engramu w całości" i nie znamy kompletnego zestawu parametrów biochemicznych, fizjologicznych i sieciowych decydujących o przechowywaniu, wydobywaniu oraz aktualizowaniu wspomnienia. Jest to cenna korekta technologicznego triumfalizmu.

Nauka potrafi uzyskać przyczynowy dostęp do części mechanizmu wcześniej pozostającego poza eksperymentalną kontrolą, ale nie jest on równoznaczny z pełnym wyjaśnieniem. Można nauczyć się naciskać określony przycisk systemu, zanim zrozumie się wszystkie jego funkcje, historię, zależności i możliwe konsekwencje interwencji.

Od obserwacji do konstrukcyjnej manipulacji pamięcią

Właśnie dlatego przełom w badaniach nad engramem ma wymiar epistemologiczny, który wykracza poza samą neuronaukę pamięci. W klasycznym eksperymencie obserwator stara się odkrywać zależności istniejące w przyrodzie; współczesna neurobiologia staje się natomiast coraz częściej nauką konstrukcyjną. Rozumienie systemu osiąga się tu poprzez jego selektywne budowanie, wyłączanie, pobudzanie i przeprogramowywanie, a następnie obserwację płynących z tego konsekwencji. Metodologiczna intuicja, że aby zrozumieć mechanizm, należy potrafić zarówno zakłócić jego działanie, jak i eksperymentalnie odtworzyć jego funkcję, przesuwa neuronaukę od prostych korelacji w stronę silnych modeli przyczynowych. W tym miejscu pojawia się jednak pierwsze napięcie aksjologiczne.

Technologia, która zwiększa zdolności poznawcze badacza, rozszerza jednocześnie jego możliwość ingerencji w przedmiot poznania. W przypadku pamięci nie jest nim wyłącznie komórka czy obwód, lecz biologiczny substrat zachowania, uczenia się, lęku, relacji z otoczeniem i - przynajmniej w przypadku człowieka - autobiograficznej ciągłości osoby. Choć nie znajdujemy się jeszcze w laboratorium pozwalającym na swobodne przepisanie ludzkiego dzieciństwa, a utożsamianie mysich badań engramowych z możliwością technicznego projektowania ludzkiej autobiografii byłoby nadużyciem translacyjnym, granica poznawcza została rzeczywiście przekroczona. Dawne pytanie o to, czy doświadczenie pozostawia uchwytny fizycznie ślad, zastąpiły pytania o to, które elementy tego śladu można reaktywować, zahamować, powiązać z innym doświadczeniem lub zmienić ich dostępność – i jak wpływa to na zachowanie. To różnica jakościowa.

Człowiek przestał być wyłącznie obserwatorem biologicznych procesów pamięciowych. W ściśle kontrolowanych warunkach eksperymentalnych uzyskał możliwość oddziaływania na jeden z mechanizmów, dzięki którym przeszłość kształtuje teraźniejszość. Najważniejszym skutkiem tego przełomu nie jest jednak sam fakt, że nauczyliśmy się świecić niebieskim światłem na odpowiednio zmodyfikowane neurony. Narzędzia takie jak fotony, wirusy AAV czy kanałorodopsyna są niezwykle

wyrafinowane, ale sens odkrycia leży poziom wyżej. Po raz pierwszy udało się z wystarczającą precyzją połączyć przyczynowo zespoły komórek aktywnych podczas konkretnego doświadczenia z późniejszą ekspresją zachowania z nim związanego. To, co dla Semona było teoretycznym „śladem", stało się eksperymentalnie dostępną populacją komórek. To, co u Hebba stanowiło model zespołu neuronalnego wzmacnianego przez doświadczenie, zaczęło poddawać się celowej reaktywacji. To, czego Lashley nie potrafił zlokalizować za pomocą rozległych lezji, można było uchwycić na poziomie selektywnego zespołu i weryfikować poprzez manipulację jego aktywnością. Nie oznacza to końca historii poszukiwań engramu; przeciwnie – dopiero tutaj zaczyna się problem znacznie trudniejszy.

Pamięć jako narzędzie adaptacyjnej antycypacji przyszłości

Skoro pamięć pozostawia biologiczny ślad, należy wyjaśnić, dlaczego ewolucja wytworzyła system, który nie przechowuje informacji wiernie, lecz ją selekcjonuje, rekonstruuje, zapomina i przekształca. Jeśli wspomnienie jest podatne na zmianę, trzeba ustalić, czy ta cecha jest słabością pamięci, czy wręcz warunkiem jej adaptacyjnej użyteczności. Skoro te same systemy hipokampalno-korowe uczestniczą zarówno w przypominaniu przeszłości, jak i w konstruowaniu możliwych przyszłości, pamięć przestaje być wyłącznie narządem historii jednostki i okazuje się jednym z biologicznych warunków wyobraźni. A skoro przyszłe działanie człowieka zależy od tego, jak organizuje on doświadczenia minione, ingerowanie w pamięć przestaje być wpływem wyłącznie na to, co było. Staje się ingerowaniem w zakres tego, co podmiot może przewidywać, czego może się obawiać, czego pragnąć, jak interpretować siebie i jakie przyszłości potrafi sobie przedstawić.

W tym miejscu neurobiologia pamięci spotyka filozofię człowieka. Odnalezienie engramu nie rozwiązuje pytania o osobę, lecz czyni je bardziej kłopotliwym. Im precyzyjniej poznajemy mechanizmy, dzięki którym przeszłe doświadczenie pozostaje obecne w zachowaniu, tym trudniej utrzymać wygodny podział na biologiczny mózg i autonomiczne, nietykalne "Ja". Jednocześnie im więcej wiemy o rozproszeniu, dynamice i rekonstrukcyjności pamięci, tym mniej uzasadnione staje się przeciwne uproszczenie, według którego osobę można sprowadzić do katalogu komórek engramowych. Człowiek uzyskał dostęp do biologicznych warunków pamiętania, lecz nie jest on jeszcze pełną teorią znaczenia pamięci. Przed nauką otworzył się więc nie skarbiec z gotową odpowiedzią, lecz kolejny poziom problemu: skoro pamięć jest plastycznym sposobem używania przeszłości, trzeba zapytać, po co organizmowi przeszłość i dlaczego mózg inwestuje tak ogromne zasoby nie tyle w jej zachowanie, ile w nieustanne wykorzystywanie jej do życia, którego jeszcze nie

było. Pytanie o biologiczny sens pamięci jest trudniejsze niż pytanie o jej mechanizm. Można bowiem coraz dokładniej opisywać aktywność hipokampa, plastyczność synaptyczną, ekspresję genów natychmiastowo-wczesnych, konsolidację czy reaktywację zespołów engramowych i dynamikę sieci neuronalnych, a mimo to nie odpowiedzieć, dlaczego ewolucja wyposażyła organizmy w kosztowną zdolność zachowywania konsekwencji minionych doświadczeń.

Sam fakt przechowywania informacji nie stanowi jeszcze wyjaśnienia funkcji. Organizm nie odnosi korzyści adaptacyjnej z przeszłości dlatego, że wydarzyła się ona kiedyś, lecz dlatego, że informacja o niej może zmienić późniejsze zachowanie. Pamięć jest zatem szczególną formą biologicznego przekraczania teraźniejszości: pozwala, aby zdarzenie już nieistniejące wpływało na reakcję wobec zdarzenia, które dopiero nastąpi. Autor książki przyjmuje mocną tezę, że pamięć służy przede wszystkim przyszłości i że mózg wykorzystuje doświadczenia historyczne do adaptacyjnej antycypacji tego, co może wydarzyć się później.

Kierunek ten znajduje ważne odpowiedniki w literaturze naukowej, wymaga jednak precyzyjnego sformułowania. Nie można stwierdzić, że współczesna neuronauka rozstrzygnęła, iż jedyną albo nadrzędną funkcją ewolucyjną pamięci jest planowanie przyszłości. Stanley Klein, Theresa Robertson i Andrew Delton przedstawiali takie ujęcie jako hipotezę funkcjonalną: jedną z zasadniczych korzyści długotrwałej pamięci epizodycznej może być przechowywanie informacji o przeszłości w służbie planowania osobistej przyszłości. Podobnie program "adaptive memory" Jamesa Nairne'a interpretuje właściwości zapamiętywania z perspektywy problemów adaptacyjnych, które organizmy musiały rozwiązywać w historii ewolucyjnej. Są to wpływowe sposoby myślenia, ale nie należy przekształcać ich w prostą teleologię, zgodnie z którą pamięć "powstała po to", aby człowiek mógł wyobrażać sobie jutro. Bezpieczniej przyjąć, że zdolność wykorzystywania informacji o doświadczeniu do modyfikowania przyszłego zachowania należy do najbardziej podstawowych funkcjonalnych korzyści pamięci. Nawet najprostszy układ uczący się ujawnia tę logikę. Jeżeli organizm po pierwszym kontakcie z niebezpieczeństwem w kolejnej podobnej sytuacji reaguje szybciej, pamięć zmieniła jego przyszłość. Jeżeli zwierzę zapamiętuje położenie pokarmu, strukturę terytorium, hierarchię społeczną albo sygnały poprzedzające atak drapieżnika, ślad przeszłości uzyskuje wartość właśnie dlatego, że pozwala inaczej zachować się później.

Nie musi istnieć świadome wyobrażenie przyszłości. Wystarczy, że przeszłe doświadczenie aktualizuje prawdopodobieństwo przyszłej reakcji. Na najbardziej elementarnym poziomie pamięć jest więc mechanizmem asymetrii czasowej: organizm po doświadczeniu nie jest już tym samym układem reagującym, którym był przed nim. U człowieka ta podstawowa właściwość osiąga jednak

szczególną postać. Minione doświadczenie może wpływać nie tylko na automatyczną reakcję, lecz także na świadomą symulację zdarzenia, które nigdy wcześniej nie nastąpiło.

Pamięć jako narzędzie konstruktywnej symulacji przyszłości

Człowiek potrafi wspomnieć podróż, ale może również wykorzystać fragmenty wielu dawnych wypraw, by wyobrazić sobie miejsce, którego jeszcze nie odwiedził. Pamięta twarz konkretnej osoby, układ pomieszczenia, dźwięk deszczu czy emocje towarzyszące dawnemu spotkaniu, a następnie składa te elementy w scenę przyszłej rozmowy, która istnieje jedynie jako możliwość. Granica między pamięcią a wyobraźnią okazuje się zatem mniej ostra, niż sugerowałby potoczny podział na „odtwarzanie rzeczywistości" i „tworzenie fikcji". Daniel Schacter i Donna Rose Addis ujęli tę zależność w hipotezę konstruktywnej symulacji epizodycznej. Jej główna idea jest elegancka: system pamięci epizodycznej nie musi przechowywać przeszłości jako nienaruszalnych, monolitycznych nagrań, ponieważ jego konstrukcyjność pozwala na elastyczne wydobywanie elementów różnych doświadczeń i łączenie ich w nowe konfiguracje reprezentujące zdarzenia możliwe. To, co z perspektywy zeznania sądowego może wydawać się wadą – podatność pamięci na rekonstrukcję i zniekształcenie – z punktu widzenia prospekcji jest właściwością funkcjonalną. System całkowicie wierny dawnemu zdarzeniu, lecz niezdolny do rozmontowywania jego elementów, byłby sprawnym archiwum, ale słabym generatorem nowych scenariuszy. Konstruktywność pamięci wymusza zatem nieuchronny kompromis pomiędzy wiernością historyczną a elastycznością adaptacyjną.

Błędy pamięci nie są więc wyłącznie awariami systemu, który w idealnym stanie działałby jak kamera. Część z nich wynika z tych samych mechanizmów, które czynią pamięć użyteczną przy rozwiązywaniu nowych problemów. Schacter wskazuje, że „grzechy" pamięci należy rozpatrywać nie tylko jako defekty, lecz jako następstwa właściwości adaptacyjnego systemu poznawczego. Zapominanie może chronić przed przeciążeniem nieistotnymi informacjami, generalizacja pozwala przenosić wiedzę między sytuacjami, a rekonstrukcja umożliwia aktualizację modelu świata. Oczywiście funkcjonalna interpretacja błędu nie znosi jego konsekwencji. Fałszywe wspomnienie może doprowadzić do pomyłki sądowej, podobnie jak generalizacja lęku może stać się elementem patologii. Chodzi jednak o to, że neurobiologia nie powinna zakładać, iż prawidłowy system pamięciowy jest fotograficznie wierny, a każda zmienność oznacza jego uszkodzenie.

Różnica między archiwum a systemem adaptacyjnym pozwala inaczej spojrzeć również na zapominanie. Gdyby nadrzędnym zadaniem pamięci było przechowywanie maksymalnie

kompletnego obrazu życia, zapominanie byłoby interpretowane przede wszystkim jako strata. Tymczasem organizm funkcjonuje w środowisku, którego warunki ulegają zmianie. Informacja użyteczna wczoraj może być dziś nieistotna, a nadmierna trwałość nieaktualnych skojarzeń utrudnia uczenie się. Sprawny system musi zatem rozwiązywać konflikt pomiędzy stabilnością a plastycznością: zachowywać dostatecznie wiele, by doświadczenie nie znikało bez śladu, oraz zmieniać dostatecznie dużo, aby nie stać się więźniem własnej historii. Z tej perspektywy pamiętanie i zapominanie nie są prostymi przeciwieństwami, lecz współpracującymi mechanizmami zarządzania wpływem przeszłości na przyszłe zachowanie.

Taki funkcjonalny punkt widzenia zmienia także rozumienie konsolidacji. Nie chodzi w niej wyłącznie o „utrwalanie pliku". Ślad pamięciowy musi osiągnąć stopień stabilności pozwalający na jego późniejsze wykorzystanie, lecz jego użyteczność zależy również od relacji z innymi reprezentacjami. Nowe doświadczenie musi zostać powiązane z wiedzą wcześniejszą, schematami, kategoriami i strukturami relacyjnymi. Człowiek nie pamięta bowiem poszczególnych epizodów jako zbioru zupełnie niezależnych wysp.

Wspólny fundament pamięci i wyobraźni

Umysł uczy się regularności między zdarzeniami. Z pojedynczych spotkań wyprowadza oczekiwania wobec ludzi, z kolejnych tras buduje mapę przestrzeni, z powtarzających się konsekwencji działań tworzy modele przyczynowe, a z niezliczonych doświadczeń społecznych wyłaniają się normy, stereotypy i strategie. Pamięć staje się w ten sposób jednym z kluczowych mechanizmów budowy wewnętrznego modelu środowiska.

Hipokamp zajmuje w tej architekturze szczególną pozycję nie dlatego, że pełni funkcję prostego magazynu wspomnień, lecz ponieważ uczestniczy w wiązaniu relacji między elementami doświadczenia. Dzięki niemu osoba, przedmiot, miejsce, kolejność zdarzeń, kontekst i skutek mogą zostać połączone w strukturę umożliwiającą późniejszą rekonstrukcję. W takim ujęciu pamiętanie i wyobrażanie zaczynają korzystać ze wspólnego problemu obliczeniowego: oba procesy wymagają zestawienia rozproszonych elementów w spójną konfigurację. Przy wspominaniu konfiguracja ta jest ograniczona przez doświadczenie minione; przy wyobrażaniu może być reorganizowana tak, by reprezentowała wydarzenie nowe.

Badania Demisa Hassabisa, Dharshana Kumarana, Seralynne Vann i Eleanor Maguire dostarczyły sugestywnego argumentu za takim związkiem. Pacjenci z obustronnym uszkodzeniem hipokampów cierpiący na amnezję mieli nie tylko trudności z odtwarzaniem osobistej przeszłości, ale w badaniu z 2007 roku wykazywali również znaczące zaburzenia w konstruowaniu nowych, wyobrażonych

doświadczeń. Tworzone przez nich reprezentacje były fragmentaryczne i pozbawione przestrzennej spójności. Wynik ten doprowadził do rozwinięcia koncepcji konstrukcji scen, zgodnie z którą istotnym wkładem hipokampa jest budowanie przestrzennie koherentnej sceny, w której można osadzać elementy wspomnienia lub wyobrażenia.

Jednocześnie późniejsza literatura wskazuje, że obraz ten nie jest jednoznaczny: nie każdy pacjent z uszkodzeniem hipokampa wykazuje identyczny deficyt wyobraźni. Charakter zaburzenia zależy m.in. od rozległości uszkodzeń, wieku ich powstania oraz dostępności wiedzy semantycznej. Wynik Hassabisa i Maguire pozostaje więc ważny, lecz nie uzasadnia twierdzenia, że hipokamp jest jedynym „organem wyobraźni". Zastrzeżenie to jest metodologicznie doniosłe, ponieważ w badaniach nad pamięcią i wyobraźnią łatwo pomylić współdzielenie mechanizmów z tożsamością procesów. Pamiętanie zdarzenia i konstruowanie zdarzenia przyszłego nie są tym samym. Wspomnienie jest ograniczone przez historię doświadczenia i podlega wymogom rozpoznania tego, co faktycznie było. Symulacja przyszłości może swobodniej rekombinować elementy i musi dodatkowo uwzględniać cele, prawdopodobieństwa, możliwości działania oraz wiedzę o obecnym stanie świata.

Badania neuroobrazowe wskazują na częściowo wspólną „core network", obejmującą między innymi przyśrodkowe obszary przedczołowe i ciemieniowe oraz struktury przyśrodkowego płata skroniowego. Wspólna aktywacja nie oznacza jednak identycznej funkcji każdego obszaru w obu zadaniach. Hipokamp może uczestniczyć w wydobywaniu szczegółów, ich relacyjnym wiązaniu, konstrukcji przestrzennego kontekstu oraz kodowaniu nowo wytworzonej reprezentacji. Spór o względne znaczenie tych mechanizmów pozostaje aktualny.

Pamięć jako narzędzie mentalnej podróży w czasie i symulacji przyszłości

Endel Tulving określił szczególną właściwość pamięci epizodycznej mianem świadomości autonoetycznej – zdolności do umysłowego odnoszenia siebie do innego momentu własnego życia. Człowiek nie tylko posiada wiedzę, że określone wydarzenie miało miejsce; potrafi on subiektywnie sytuować się w nim jako uczestnik. W tej perspektywie pamięć epizodyczna staje się jednym z mechanizmów "mentalnej podróży w czasie". Późniejsze badania nad prospekcją ujawniły, że owa podróż może przebiegać również w kierunku przyszłości. Człowiek projektuje siebie w sytuacjach, których jeszcze nie doświadczył, nadając im przestrzeń, uczestników, emocje, cele oraz potencjalne następstwa. Autobiograficzne "Ja" zostaje zatem rozciągnięte między pamiętaną przeszłością a wyobrażoną przyszłością. To rozciągnięcie nie jest jedynie luksusem introspekcyjnej świadomości.

Badania nad episodic future thinking wskazują na jego związki z podejmowaniem decyzji, regulacją emocji, nawigacją oraz pamięcią prospektywną. Wyobrażenie konkretnego przyszłego zdarzenia może modyfikować ocenę odroczonej nagrody, ułatwiać realizację zamiaru lub przygotowywać działania niezbędne do osiągnięcia celu. Nie oznacza to jednak, że każda decyzja wymaga szczegółowej symulacji autobiograficznej. Znaczna część naszych zachowań opiera się na nawykach, wiedzy semantycznej, heurystykach czy innych mechanizmach uczenia. Prospekcja epizodyczna stanowi raczej jedną z wielu form myślenia o przyszłości, obok przewidywania, intencji i planowania. Rozróżnienie to pozwala uniknąć częstego nieporozumienia między „pamięcią przyszłości" a wyobrażaniem sobie przyszłości. Pamięć prospektywna oznacza bowiem zdolność zapamiętania zamiaru i jego wykonania w odpowiednim momencie – np. konieczność wysłania dokumentu, przyjęcia leku czy wykonania telefonu. Episodic future thinking to z kolei symulowanie konkretnego przyszłego doświadczenia. Mechanizmy te mogą ze sobą współpracować, lecz nie są tożsame.

Można pamiętać o konieczności wykonania czynności bez szczegółowego wyobrażania jej sobie; można również godzinami wizualizować przyszłość, nie tworząc przy tym żadnej konkretnej intencji. Współczesne badania nad mentalną reprezentacją przyszłości coraz wyraźniej traktują prospekcję jako rodzinę powiązanych procesów, a nie pojedynczą funkcję poznawczą. Metaanalizy neuroobrazowe wykazują zarówno wspólne, jak i odmienne komponenty neuronalne episodic future thinking, pamięci prospektywnej oraz innych form podejmowania decyzji dotyczących przyszłości.

Autor książki wiąże tę architekturę z procesami replay i preplay w hipokampie. Zjawisko replay należy do najbardziej fascynujących odkryć dotyczących relacji między pamięcią a działaniem. W doświadczeniach na gryzoniach sekwencje aktywności komórek miejsca, obserwowane podczas przemieszczania się po środowisku, mogą pojawiać się ponownie w skondensowanej formie podczas odpoczynku i snu – często w czasie ostrych fal i szybkich oscylacji hipokampalnych (sharp-wave ripples). Takie odtwarzanie wiąże się z konsolidacją pamięci, lecz coraz więcej modeli przypisuje mu także znaczenie dla uczenia wartości, aktualizacji reprezentacji oraz planowania zachowania.

Rekombinacja pamięci jako fundament wyobraźni i predykcji

Należy jednak zachować szczególną ostrożność wobec pokusy nadania procesowi replay jednej, ostatecznej funkcji. Współczesna literatura ujawnia spór między interpretacjami, według których

odtwarzanie sekwencji służy przede wszystkim planowaniu tras prowadzących do aktualnego celu, a koncepcjami traktującymi je jako mechanizm budowy i utrzymywania bardziej ogólnej mapy świata. Prace z 2024 i 2025 roku próbują integrować te stanowiska, pokazując, że replay może być priorytetyzowany zależnie od oczekiwanej przyszłej użyteczności informacji: system może „ćwiczyć" zarówno drogę do obecnego celu, jak i struktury potrzebne wobec celów, które staną się istotne później. Nie jest więc zasadne proste twierdzenie, że każda sekwencja replay jest mózgowym filmem z przeszłości albo planem przyszłości. Samo rozróżnienie tych interpretacji pokazuje jednak, jak głęboko pamięć i modelowanie przyszłego działania przenikają się na poziomie obliczeniowym. Jeszcze większej ostrożności wymaga termin preplay.

W badaniach zwierzęcych opisywano sekwencje aktywności neuronalnej pojawiające się przed przebyciem określonej trajektorii, które przypominały późniejsze wzorce przestrzenne. Fenomen ten stał się atrakcyjną podstawą metafory mózgu „próbującego przyszłość". Rzeczywiste interpretacje są jednak bardziej złożone. Sekwencje mogą odzwierciedlać istniejącą strukturę sieci, ogólne reguły przestrzenne, stan przygotowania albo generowanie możliwych trajektorii, a nie literalne przewidywanie konkretnego wydarzenia. Hipoteza, że replay i preplay dostarczają neuronalnych cegiełek wykorzystywanych w planowaniu i wyobrażaniu, jest naukowo produktywna, lecz należy ją odróżniać od twierdzenia, że w hipokampie można po prostu „odczytać przyszłość". Przeglądy relacji hipokampa, predykcji i wyobraźni konsekwentnie wskazują na potencjalny mechanizm generowania oraz rekombinowania sekwencji, a nie na deterministyczną projekcję przyszłych zdarzeń.

Właśnie pojęcie rekombinacji pozwala najlepiej uchwycić związek pamięci z wyobraźnią. Wyobraźnia nie tworzy ex nihilo; nawet najbardziej fantastyczna scena korzysta z wcześniej przyswojonych reprezentacji. Smok może posiadać skrzydła znanego zwierzęcia, łuski innego, zachowywać się według społecznych intencji przypisywanych ludziom i poruszać w przestrzeni skonstruowanej na podstawie wcześniejszych doświadczeń percepcyjnych. Człowiek potrafi wymyślać konfiguracje, których nigdy nie widział, ponieważ nie jest ograniczony do ponownego odtwarzania kompletnych epizodów – potrafi rozkładać doświadczenie na elementy i ponownie je scalać. Konstruktywna natura pamięci dostarcza materiału dla kombinatorycznej natury wyobraźni, choć nie oznacza to, że każda wyobrażona treść jest po prostu kolażem jawnych wspomnień.

Wielkie znaczenie mają tu wiedza semantyczna, język, pojęcia abstrakcyjne, schematy kulturowe, modele społeczne i zdolności wnioskowania. Człowiek może wyobrazić sobie ustrój polityczny, strukturę matematyczną albo instytucję, których nie sposób zredukować do obrazu autobiograficznego. Jednak nawet abstrakcyjna innowacja operuje na zasobach wcześniej

wyuczonych relacji. Pamięć jest zatem nie tyle magazynem gotowych obrazów dla wyobraźni, co warunkiem posiadania materiału, na którym mogą pracować inne systemy poznawcze. To prowadzi do ważnej konsekwencji w rozumieniu kreatywności: nie wymaga ona przeciwstawiania pamięci nowości. Przeciwnie, możliwość tworzenia nowego zależy w dużej mierze od zdolności reorganizowania tego, co już zostało przyswojone. Ekspert może dostrzec nowe rozwiązanie dzięki rozległej strukturze wiedzy, która pozwala zauważyć analogię niewidoczną dla nowicjusza. Kompozytor wprowadza nowatorską konfigurację, operując na strukturach muzycznych ukształtowanych przez lata słuchania i ćwiczenia. Naukowiec proponuje hipotezę, łącząc wcześniej odległe modele, wyniki i obserwacje. Podobieństwo do neurobiologicznej rekombinacji pamięci nie powinno być jednak traktowane zbyt dosłownie. Poziom neuronalny, poznawczy i kulturowy opisują odmienne skale organizacji; interdyscyplinarność staje się poznawczo użyteczna dopiero wtedy, gdy nie zaciera tej różnicy.

Związek pamięci z przewidywaniem prowadzi również ku szerszym koncepcjom mózgu jako systemu predykcyjnego. W wielu współczesnych teoriach percepcja i działanie są interpretowane jako procesy wykorzystujące wcześniejsze doświadczenie do formowania oczekiwań wobec napływających informacji. Nie oznacza to, że całą pamięć można sprowadzić do predictive processing ani że hipoteza predykcyjnego mózgu stanowi zamkniętą teorię wszystkich funkcji psychicznych. Pozwala jednak zauważyć zasadniczą ciągłość: skuteczny organizm nie może reagować wyłącznie na to, co właśnie nastąpiło. Musi wykorzystywać regularności przeszłości do przygotowania się na stany prawdopodobne, a następnie korygować model, gdy rzeczywistość odbiega od oczekiwań. Pamięć spełnia w takim układzie rolę szczególnie przewrotną. Gdyby zapis był absolutnie wierny, lecz niemożliwy do generalizacji, organizm wiedziałby bardzo dużo o konkretnych sytuacjach minionych, a bardzo mało o tym, jak zachować się w sytuacji podobnej, choć nieidentycznej. Generalizacja wymaga abstrahowania od części szczegółów, kategoryzacja – traktowania odmiennych zdarzeń jako reprezentantów podobnej klasy, a predykcja – uznania, że pewna prawidłowość z przeszłości może obowiązywać również później. Wszystkie te procesy oznaczają odejście od dosłownego odtwarzania. Biologicznie użyteczna pamięć musi więc balansować między zachowaniem jednostkowości doświadczenia a wydobywaniem reguł przekraczających pojedynczy epizod.

Pamięć jako filtr wartościujący i model predykcyjny

Mechanizm ten widać szczególnie wyraźnie w lęku. Zwierzę zaatakowane w określonym miejscu odnosi korzyść, jeśli potrafi później rozpoznać nie tylko to konkretne miejsce, lecz także sygnały wskazujące na podobne zagrożenie. Zbyt wąska generalizacja może doprowadzić do ponownego

narażenia się na niebezpieczeństwo; zbyt szeroka zaś sprawi, że ogromna część środowiska stanie się źródłem lęku, co sparaliżuje eksplorację. Adaptacja wymaga kalibracji.

Ten sam problem w bardziej złożonej postaci powraca u człowieka w zaburzeniach lękowych i traumatycznych, gdzie niegdyś użyteczne mechanizmy uczenia mogą nadmiernie generalizować sygnały zagrożenia. Pamięć traumatyczna staje się wówczas nie tyle „zbyt dobra", co funkcjonalnie źle skalibrowana względem aktualnego otoczenia. Podobnie działa mechanizm nagrody.

Wspomnienie korzystnego doświadczenia wpływa na przyszłe wybory nie dlatego, że organizm kontempluje historyczną prawdę dla niej samej, lecz ponieważ przeszłe wzmocnienie zmienia oczekiwaną wartość działań. Na bardziej złożonym poziomie człowiek potrafi wykorzystać doświadczenia do symulowania rezultatów, których nigdy wcześniej nie osiągnął. Pamięć i wyobraźnia współpracują więc z systemami wartościowania: nie wystarczy wyobrazić sobie przyszłość – trzeba jeszcze przypisać możliwym scenariuszom znaczenie, atrakcyjność, niebezpieczeństwo lub koszt. W tym punkcie pamięć zaczyna wyraźnie stykać się z aksjologią.

Biologiczny system pamięciowy nie przechowuje wszystkich informacji z równą siłą. Na kodowanie i późniejsze wydobywanie danych wpływają uwaga, nowość, nagroda, zagrożenie, pobudzenie emocjonalne oraz zgodność lub sprzeczność z oczekiwaniami. Człowiek nie buduje więc swojej przyszłości na neutralnym archiwum, lecz na przeszłości przefiltrowanej przez znaczenia. To, co zostało zakodowane jako istotne, ma większą szansę kształtować późniejsze oczekiwania; te z kolei wpływają na uwagę, interpretację i kolejne procesy zapamiętywania. Powstaje pętla, w której pamięć nie tylko przechowuje wartościowania, ale pomaga je reprodukować.

Właśnie dlatego dwa organizmy w podobnym otoczeniu mogą żyć poznawczo w odmiennych światach. Ich wcześniejsze doświadczenia wyznaczają różne priorytety uwagi, oczekiwania i interpretacje wieloznacznych zdarzeń. W przypadku człowieka dochodzą do tego język, socjalizacja, wiedza kulturowa i narracje zbiorowe. Pamięć autobiograficzna nie jest zamkniętym produktem jednostkowego mózgu; rozwija się w świecie rodzinnych opowieści, kategorii językowych, praktyk upamiętniania, instytucji i norm społecznych. Biologiczny mechanizm engramu staje się w ten sposób podstawą procesu, którego treść w znacznej mierze pochodzi spoza czaszki.

Ta uwaga jest szczególnie istotna przy przejściu od pamięci do tożsamości. Jeżeli człowiek wykorzystuje wspomnienia do przewidywania własnego zachowania, pamięć uczestniczy w konstruowaniu nie tylko obrazu tego, kim był, lecz również tego, kim może się stać. Autobiograficzne „Ja" funkcjonuje zatem częściowo jako model predykcyjny osoby.

Pamięć jako konstrukcyjny fundament wyobraźni i symulacji przyszłości

Osoba pamiętająca siebie jako kogoś zdolnego do przezwyciężania trudności może inaczej symulować kolejną sytuację kryzysową niż człowiek, którego wspomnienia organizują narrację bezradności. Nie oznacza to, że za pomocą prostej manipulacji można dowolnie zmienić osobowość, lecz pokazuje, dlaczego pamięć autobiograficzna i wyobrażenie własnej przyszłości są ze sobą tak silnie powiązane. Interesujący przykład znaczenia tego mechanizmu dostarczają badania nad episodic future thinking w depresji. Współczesne przeglądy wskazują, że u osób z objawami depresyjnymi oraz w badaniach nad ryzykiem samobójczym obserwuje się mniejszą dostępność pozytywnie walentnych scenariuszy, co wpływa na afektywny charakter wyobrażanych zdarzeń. Nie wynika z tego, że depresję można sprowadzić do braku pozytywnych wyobrażeń, ani że sam trening prospekcji rozwiązuje złożone zaburzenie psychiczne. Ukazuje to jednak kliniczną wagę pytania o to, jakie przyszłości człowiek potrafi sobie reprezentować. Pamięć jest zatem jednocześnie zasobem i ograniczeniem wyobraźni; konstruujemy przyszłość z materiału dostarczonego przez dotychczasowe doświadczenia.

Im bogatszy i bardziej elastyczny repertuar przeżyć, tym więcej potencjalnych kombinacji. Jednocześnie traumy, utrwalone schematy, silne lęki i nawykowe wartościowania mogą zawężać przestrzeń symulowanych możliwości. Wyobraźnia nie jest absolutną wolnością od pamięci, lecz sposobem, w jaki pamięć zostaje uwolniona od konieczności wiernego odtwarzania przeszłości. Pozwala to również inaczej spojrzeć na zjawisko fałszywego wspomnienia. System zdolny do twórczej rekombinacji musi bowiem rozwiązywać problem źródła elementów reprezentacji: czy dany szczegół został rzeczywiście przeżyty, zasłyszany, wyobrażony, zasugerowany, czy tylko wielokrotnie przywoływany. Im większa zdolność konstruowania scen, tym ważniejszy staje się monitoring źródła, a zawodność tego procesu otwiera drogę do błędnego przypisania elementu wyobrażonego do rzeczywistego doświadczenia. Neurobiologiczne i psychologiczne badania nad pamięcią spotykają się tutaj w jednym punkcie: możliwość twórczego wykorzystywania przeszłości oraz podatność na jej zniekształcenie wyrastają z tej samej konstrukcyjnej architektury. Najgłębsza odpowiedź na pytanie „dlaczego pamięć?” nie prowadzi więc do jednego celu.

Pamięć umożliwia uczenie, rozpoznawanie, generalizację, budowę map relacyjnych, przewidywanie, przygotowanie reakcji, podtrzymywanie zamiarów, konstrukcję autobiografii i symulowanie możliwości. Choć poszczególne systemy pamięciowe – proceduralna, semantyczna, robocza i epizodyczna – realizują te funkcje w odmienny sposób, to właśnie pamięć epizodyczna wyróżnia się zdolnością osadzania wydarzeń w relacji do osoby, miejsca i czasu. Dzięki temu

jednostkowe doświadczenie może zostać ponownie wykorzystane w konstrukcji możliwej przyszłości. Autor książki trafnie ujmuje ten zwrot, stwierdzając, że pamięć i wyobraźnia wykorzystują powiązane układy hipokampalno-korowe, a elastyczność śladów umożliwia rekombinowanie wcześniejszych doświadczeń w nowe symulacje. Naukowa rekonstrukcja wymaga jedynie osłabienia twierdzenia o ich pełnej „jednolitości".

Pamięć jako mechanizm projektowania przyszłości

Pamięć i wyobraźnia nie są dwiema nazwami tego samego procesu. Trafniej byłoby stwierdzić, że choć częściowo współdzielą mechanizmy wydobywania, wiązania i reorganizowania informacji, różnią się ograniczeniami, celami oraz relacją do rzeczywistości historycznej. Dzięki temu problem zyskuje wymiar filozoficzny. Klasyczna intuicja przeciwstawiała pamięć, zwróconą ku temu, co rzeczywiście było, wyobraźni, która otwiera przestrzeń tego, czego nie ma. Neurobiologia pokazuje jednak, że podział ten jest funkcjonalny, ale nie absolutny.

Mentalna konstrukcja przyszłości powstaje w organizmie posiadającym historię, a ta historia pozostaje użyteczna właśnie dlatego, że może zostać przekształcona w przewidywanie. Heraklitejska metafora rzeki otrzymuje tutaj nieoczekiwane rozwinięcie: nie tylko nie wchodzimy dwa razy do identycznej rzeki wspomnienia; z wody tego, co minęło, budujemy również wyobrażenia rzek, do których jeszcze nigdy nie weszliśmy. Oznacza to, że manipulacja pamięcią może mieć konsekwencje znacznie szersze niż zmiana stosunku do przeszłości. Jeśli wspomnienie dostarcza materiału do oceny ryzyka, planowania czy symulowania przyszłości, zmiana dostępności lub znaczenia śladu może wpływać na późniejsze decyzje. Nie oznacza to, że modyfikacja pojedynczego engramu automatycznie przekształca tożsamość lub wolę — układ poznawczy jest zbyt rozproszony i redundantny, by przyjąć taki prosty determinizm. Wynika z tego jednak coś bardziej subtelnego: ingerencja w pamięć może zmienić zbiór informacji, z którego organizm konstruuje swoje przewidywania.

W tym miejscu pojawia się neuroetyczna trudność. Zmniejszenie patologicznej reaktywności traumatycznego wspomnienia może przywrócić człowiekowi zdolność działania, ale fakt biologiczny — że przeszłość kształtuje przyszłe wybory poprzez modyfikowalne reprezentacje — zmusza do pytania o granice interwencji. Czy terapeutycznie pożądane jest osłabienie lęku przy zachowaniu treści autobiograficznej zdarzenia? Czy zmiana emocjonalnej walencji pamięci usuwa tylko cierpienie, czy również moralne i społeczne znaczenie doświadczenia? Czy człowiek po zasadniczej modyfikacji wspomnienia nadal podejmuje decyzje z tej samej pozycji autobiograficznej? Pytania te

nie wynikają z fantastyki technologicznej, lecz z funkcjonalnego rozumienia pamięci jako mechanizmu przekładania historii na działanie.

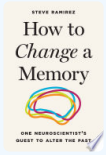
W ten sposób neurobiologia pozbawia nas drugiej strefy komfortu. Pierwszą utraciliśmy, gdy engram przestał być czystą hipotezą i zaczął poddawać się eksperymentalnej identyfikacji. Drugą tracimy, gdy okazuje się, że pamięć nie jest bezpiecznie zamkniętym magazynem rzeczy minionych. Jest maszyną roboczą teraźniejszości i jednym z zasobów przyszłości. Mózg nie zachowuje doświadczeń jedynie po to, by oddawać hołd temu, co było; wykorzystuje je do przygotowania reakcji na to, czego jeszcze nie ma.

W konsekwencji wyobraźnia nie jest przeciwieństwem pamięci, lecz jednym z najwyższych przejawów możliwości systemu zdolnego do dekomponowania i reorganizowania doświadczenia. Człowiek może pamiętać świat, którego już nie ma, i właśnie dlatego potrafi konstruować światy, których jeszcze nigdy nie było. Zdolność ta jest źródłem planowania, wynalazku i nadziei, ale także błędu, katastroficznej antycypacji czy lęku przed zdarzeniem, które może nigdy nie nadejść. Neurobiologia pamięci nie odkrywa zatem prostego archiwum, lecz maszynerię, dzięki której historia organizmu jest nieustannie przerabiana na hipotezy dotyczące przyszłości.

Dopiero z takim rozumieniem funkcji pamięci można właściwie powrócić do laboratorium Tonegawy, Liu i Ramireza. Gdyby engram był jedynie martwym zapisem przeszłości, jego optogenetyczna reaktywacja pozostawałaby fascynującym eksperymentem technicznym. Jeśli jednak engram uczestniczy w organizowaniu przyszłego zachowania, jego sztuczne wzbudzenie oznacza coś więcej: badacz nie tylko przywołuje biologiczny ślad tego, co było, lecz eksperymentalnie zmienia warunki, na podstawie których organizm interpretuje teraźniejszość i przyszłość. W tym miejscu optogenetyka przestaje być wyłącznie metodą obserwacji pamięci, a staje się technologią przyczynowej ingerencji w relację między doświadczeniem, zachowaniem a przyszłością.

> Mózg nie przechowuje doświadczeń po to, by oddawać hołd temu, co minęło, lecz by przetwarzać historię na hipotezy o tym, co dopiero nadejdzie. W tej perspektywie wyobraźnia nie jest zaprzeczeniem pamięci, lecz jej najwyższą formą – zdolnością do budowania światów, których nigdy nie było, z materiałów, które już przeżyliśmy. Czy zatem modyfikując biologiczny ślad przeszłości, zmieniamy jedynie wspomnienia, czy w rzeczywistości przeprogramowujemy horyzont naszych przyszłych możliwości?

Inspiracje

[1] 

"How to Change a Memory" Steve Ramirez

Princeton University Press | ISBN: 9780691266688

Steve Ramirez (ur. 1988) jest amerykańskim neurobiologiem i profesorem nadzwyczajnym psychologii i nauk o mózgu na Uniwersytecie Bostońskim. Uzyskał tytuł licencjata z neurobiologii na Uniwersytecie Bostońskim w 2010 roku i obronił doktorat z neurobiologii i nauk kognitywnych w Massachusetts Institute of Technology w laboratorium noblisty Susumu Tonegawy. Ramirez jest powszechnie uznawany za pionierskie badania nad pamięcią, w szczególności za wykorzystanie optogenetyki do identyfikacji, manipulacji i sztucznej reaktywacji zespołów neuronalnych zwanych engramami. Wraz ze swoim zmarłym partnerem badawczym Xu Liu, zademonstrował zdolność do wszczepiania fałszywych wspomnień myszom i selektywnej zmiany emocji związanych z pamięcią. Jego badania koncentrują się na neuronalnych mechanizmach uczenia się i pamięci, mając na celu opracowanie nowatorskich interwencji terapeutycznych w leczeniu schorzeń neuropsychiatrycznych, takich jak zespół stresu pourazowego, depresja i choroba Alzheimera.

Steve Ramirez *(born 1988) is an American neuroscientist and Associate Professor of Psychological and Brain Sciences at Boston University. He earned his bachelor's degree in neuroscience from Boston University in 2010 and completed his Ph.D. in brain and cognitive sciences at the Massachusetts Institute of Technology in the laboratory of Nobel laureate Susumu Tonegawa. Ramirez is widely recognized for his groundbreaking work in memory research, particularly using optogenetics to identify, manipulate, and artificially reactivate neural ensembles known as engrams. Alongside his late research partner Xu Liu, he demonstrated the ability to implant false memories in mice and selectively alter memory-associated emotions. His research investigates the neural mechanisms of learning and memory with the goal of developing novel therapeutic interventions for neuropsychiatric conditions such as post-traumatic stress disorder, depression, and Alzheimer's disease.*

Boston University

Literatura uzupełniająca

Książki

Książki autora i dzieła przywołane w tekście:



[1] "Project Total Recall"

Steve Ramirez

2025 | Robinson Press | ISBN: 9781472141743

Książki autorów przywoływanych i literatura pokrewna:



[2] "Die mnemischen Empfindungen in ihren Beziehungen zu den Originalempfindungen"

Richard Wolfgang Semon



[3] "Homing and related activities of birds"

Karl Lashley

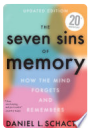
Hutson Street Press | ISBN: 9781024914764



[4] "Introducing Psychology"

Daniel Schacter

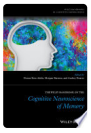
Macmillan Higher Education | ISBN: 9781319373856



[5] "The Seven Sins of Memory"

Daniel Schacter

HMH | ISBN: 9780547347455



[6] "The Wiley Handbook on the Cognitive Neuroscience of Memory"

Donna Rose Addis

John Wiley & Sons | ISBN: 9781118332597



[7] "Elements of Episodic Memory"

Endel Tulving

1983 | Oxford University Press, USA

Artykuły naukowe

Prace autorów przywoływanych w tekście:

[1] "Brain mechanisms and intelligence: A quantitative study of injuries to the brain."

Karl Spencer Lashley

1929 | University of Chicago Press eBooks | DOI: 10.1037/10017-000

Źródło

[2] **"Brain mechanisms and intelligence, 1929."**

Karl Spencer Lashley

1948 | Appleton-Century-Crofts eBooks | DOI: 10.1037/11304-060

Źródło

[3] **"The Organism: A Holistic Approach to Biology Derived from Pathological Data in Man."**

Kurt Goldstein, Karl Spencer Lashley

1963 | JAMA | DOI: 10.1001/jama.1963.03710120089055

Źródło

[4] **"The Mechanism of Vision: XV. Preliminary Studies of the Rat's Capacity for Detail Vision"**

Karl Spencer Lashley

1938 | The Journal of General Psychology | DOI: 10.1080/00221309.1938.9709894

Źródło

[5] **"Optogenetics and Psychiatry: Applications, Challenges, and Opportunities"**

Karl Deisseroth

2012 | Biological Psychiatry | DOI: 10.1016/j.biopsych.2011.12.021

Źródło

[6] **"Optogenetics: development and application"**

Karl Deisseroth

2009 | Neuroscience Research | DOI: 10.1016/j.neures.2009.09.1640

Źródło

[7] **"Optogenetics"**

Karl Deisseroth

2010 | Nature Methods | DOI: 10.1038/nmeth.f.324

Źródło

[8] **"The Essential Role of Hippocampal CA1 NMDA Receptor–Dependent Synaptic Plasticity in Spatial Memory"**

Joe Z. Tsien, Patricio T. Huerta, Susumu Tonegawa

1996 | Cell | DOI: 10.1016/s0092-8674(00)81827-9

Źródło

[9] "Engrams and circuits crucial for systems consolidation of a memory"

貴司 北村, Sachie K. Ogawa, Dheeraj S. Roy, Teruhiro Okuyama, Mark D. Morrissey, Susumu Tonegawa

2017 | Science | DOI: 10.1126/science.aam6808

Źródło

[10] "Optogenetics 3.0"

Xu Liu, Susumu Tonegawa

2010 | Cell | DOI: 10.1016/j.cell.2010.03.019

Źródło

[11] "The future-orientation of memory: Planning as a key component mediating the high levels of recall found with survival processing"

Stanley B. Klein, Theresa E. Robertson, Andrew W. Delton

2011 | Memory | DOI: 10.1080/09658211.2010.537827

Źródło

[12] "A feature model of immediate memory"

James S. Nairne

1990 | Memory & Cognition | DOI: 10.3758/bf03213879

Źródło

[13] "Adaptive memory: Survival processing enhances retention."

James S. Nairne, Sarah R. Thompson, Josefa N. S. Pandeirada

2007 | Journal of Experimental Psychology Learning Memory and Cognition | DOI: 10.1037/0278-7393.33.2.263

Źródło

[14] "Remembering Over the Short-Term: The Case Against the Standard Model"

James S. Nairne

2002 | Annual Review of Psychology | DOI: 10.1146/annurev.psych.53.100901.135131

Źródło

[15] "Adaptive Memory"

James S. Nairne, Josefa N. S. Pandeirada, Sarah R. Thompson

2008 | Psychological Science | DOI: 10.1111/j.1467-9280.2008.02064.x

Źródło

[16] "Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search"

David Silver, Aja Huang, Chris J. Maddison, Arthur Guez, Laurent Sifre, Demis Hassabis

2016 | Nature | DOI: 10.1038/nature16961

Źródło

[17] "Overcoming catastrophic forgetting in neural networks"

James Kirkpatrick, Razvan Pascanu, Neil C. Rabinowitz, Joel Veness, Guillaume Desjardins, Demis Hassabis

2017 | Proceedings of the National Academy of Sciences | DOI: 10.1073/pnas.1611835114

Źródło

[18] "AlphaFold Protein Structure Database: massively expanding the structural coverage of protein-sequence space with high-accuracy models"

Mihály Váradi, Stephen Anyango, Mandar Deshpande, Sreenath Sasidharan Nair, Cindy Natassia, Demis Hassabis

2021 | Nucleic Acids Research | DOI: 10.1093/nar/gkab1061

Źródło

[19] "Protein complex prediction with AlphaFold-Multimer"

Richard Evans, Michael O'Neill, Alexander Pritzel, Natasha Antropova, Andrew Senior, Demis Hassabis

2021 | bioRxiv (Cold Spring Harbor Laboratory) | DOI: 10.1101/2021.10.04.463034

Źródło

[20] "Hippocampal–anterior thalamic pathways for memory: uncovering a network of direct and indirect actions"

John P. Aggleton, Shane M. O'Mara, Seralynne D. Vann, Nick F. Wright, Marian Tsanov

2010 | European Journal of Neuroscience | DOI: 10.1111/j.1460-9568.2010.07251.x

Źródło

[21] "The Cognitive Thalamus as a Gateway to Mental Representations"

Mathieu Wolff, Seralynne D. Vann

2018 | Journal of Neuroscience | DOI: 10.1523/jneurosci.0479-18.2018

Źródło

[22] "Sparing of the familiarity component of recognition memory in a patient with hippocampal pathology"

John P. Aggleton, Seralynne D. Vann, Christine E. Denby, Sophie L. Dix, Andrew R. Mayes

2005 | Neuropsychologia | DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2005.01.019

Źródło

[23] "The anterior thalamus provides a subcortical circuit supporting memory and spatial navigation"

Maciej M. Jankowski, Kim C. Rönnqvist, Marian Tsanov, Seralynne D. Vann, Nicholas F. Wright

2013 | Frontiers in Systems Neuroscience | DOI: 10.3389/fnsys.2013.00045

Źródło

[24] "Using Imagination to Understand the Neural Basis of Episodic Memory"

Demis Hassabis, Dharshan Kumaran, Eleanor A. Maguire

2007 | The Journal of Neuroscience | DOI: 10.1523/jneurosci.4549-07.2007

Źródło

[25] "Autobiographical memory in semantic dementia: A longitudinal fMRI study"

Eleanor A. Maguire, Dharshan Kumaran, Demis Hassabis, Michael D. Kopelman

2010 | Neuropsychologia | DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2009.08.020

Źródło

[26] "Does memory research have a realistic future?"

E. Maguire

2022 | Trends in Cognitive Sciences | DOI: 10.1016/j.tics.2022.07.006

Źródło

[27] "Age-Related Differences in Neural Activity during Memory Encoding and Retrieval: A Positron Emission Tomography Study"

Roberto Eduardo Luis Cabeza, Cheryl L. Grady, Lars H Nyberg, Anthony Randal McIntosh, Endel Tulving

1997 | Journal of Neuroscience | DOI: 10.1523/jneurosci.17-01-00391.1997

Źródło

Artykuły naukowe autora:

[28] "Optogenetic stimulation of a hippocampal engram activates fear memory recall"

Xu Liu, Steve Ramirez, Petti T. Pang, Corey B. Puryear, Arvind Govindarajan

2012 | Nature | DOI: 10.1038/nature11028

Źródło

[29] "Creating a False Memory in the Hippocampus"

Steve Ramirez, Xu Liu, Pei-Ann Lin, Junghyup Suh, Michele Pignatelli

2013 | Science | DOI: 10.1126/science.1239073

Źródło

[30] "Memory Engram Cells Have Come of Age"

Susumu Tonegawa, Xu Liu, Steve Ramirez, Roger L. Redondo

2015 | Neuron | DOI: 10.1016/j.neuron.2015.08.002

Źródło

[31] "Bidirectional switch of the valence associated with a hippocampal contextual memory engram"

Roger L. Redondo, Joshua Kim, Autumn L. Arons, Steve Ramirez, Xu Liu

2014 | Nature | DOI: 10.1038/nature13725

Źródło

[32] "Activating positive memory engrams suppresses depression-like behaviour"

Steve Ramirez, Xu Liu, Christopher J. MacDonald, Anthony Moffa, Joanne Y. Zhou

2015 | Nature | DOI: 10.1038/nature14514

Źródło

[33] "Assessments of dentate gyrus function: discoveries and debates"

Mia Borzello, Steve Ramirez, Alessandro Treves, Inah Lee, Helen E. Scharfman

2023 | Nature reviews. Neuroscience | DOI: 10.1038/s41583-023-00710-z

Źródło

[34] "Inception of a false memory by optogenetic manipulation of a hippocampal memory engram"

Xu Liu, Steve Ramirez, Susumu Tonegawa

2013 | Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences | DOI: 10.1098/rstb.2013.0142

Źródło

[35] "Artificially Enhancing and Suppressing Hippocampus-Mediated Memories"

Briana K. Chen, Nathen J. Murawski, Christine Cincotta, Olivia P. McKissick, Abby Basya Finkelstein, Steve Ramirez

2019 | Current Biology | DOI: 10.1016/j.cub.2019.04.065

Źródło

[36] "Identification and optogenetic manipulation of memory engrams in the hippocampus"

Steve Ramirez, Susumu Tonegawa, Xu Liu

2014 | Frontiers in Behavioral Neuroscience | DOI: 10.3389/fnbeh.2013.00226

Źródło

[37] "An implantable piezoelectric ultrasound stimulator (ImPULS) for deep brain activation"

Jason F. Hou, Md Osman Goni Nayeem, Kian A. Caplan, Evan A. Ruesch, Albit J. Caban, Steve Ramirez

2024 | Nature Communications | DOI: 10.1038/s41467-024-48748-6

Źródło

Treść tworzy Fundacja Dobre Państwo.
Redaguje i publikuje APA ONE, autorski system redakcyjny Fundacji oparty na AI.
APA ONE Publishing System
Fundacja Dobre Państwo © 2026
Article ID: 7d95d5af-2d02-423e-9e54-ed0fbd308925