인간 두뇌의 대통일 모형 구축

DOI: 10.3938/PhiT.25.042

한 승 기

A Grand Unified Model of Our Human Brain

Seung Kee HAN

Our brain is one of the most complicated complex systems in the universe. It is composed of more than one hundred billions neurons connected through about one hundred trillions synapses. Because of its complexity, our brain remains as one of the most difficult challenges to be solved. Here, we introduce both the recent work of an international consortium organized for the systematic analysis of the structural organization of the brain connectome by utilizing the graphical methods of complex network study and the grand challenge of the human brain project to construct a grand unified model of our brain. Finally, as physicists, we discuss what can be done to accelerate the successful completing of a grand unified model of our brain.

두뇌 복잡계

유전자의 이중나선 구조를 밝힘으로써 생명과 진화의 신비를 규명하는 데 크게 기여한 Francis Crick 박사는 인간의 의식과 영혼의 정체에 관한 연구로 발간한 그의 저서 “놀라운 가설”에서, “우리가 기쁨을 느끼고, 슬퍼하며 기억하게 하고, 우리의 자아와 자유 의지를 인지하게 하는 것은 다름이 아니라 두뇌신경계를 이루고 있는 무수한 신경세포들의 역할이다”라고 하였다.^[1]

우리 두뇌 신경계는 대략 1000억 개의 신경세포로 구성되어

있으며, 이들 신경세포들은 100조 개의 정도의 시냅스를 통해서 서로 연결되어 있다. 구체적으로 이들 신경세포 집단이 어떻게 다양한 기능을 발휘할 수 있는가? 두뇌 신경계의 제일 기본적인 구성단위인 신경세포의 기능은 여러 가지 이온 채널의 개폐에 의한 전기생리화학적 활동으로 발생하는 신경 발화를 통하여 정보를 처리하고 있다. 그리고 시냅스 연결에 의해서 다른 신경 세포의 신경 발화를 앞당기거나 늦추는 방식으로 영향을 주고 있다. 단순히 생각하면 개개 신경 세포의 역할과 그들 사이의 상호작용을 알고 있으므로 두뇌 신경계 전체 기능을 쉽게 밝힐 수 있을 것으로 생각되지만, 아직도 두뇌의 신비는 그대로 남아있다.

이것은 두뇌의 공간 구조적 특성이 우리가 여태까지 다루어 왔던 어떤 물질과도 비교할 수 없을 정도의 복잡성을 띠고 있기 때문이다. 그림 1에서 신경계에 국한해서 보더라도, 마이크로 크기의 신경세포에서 수십 센티미터 크기의 전체 두뇌 신경계까지 이르는 복잡한 계층적 구조를 가지고 있다. 또한, 시간적으로는 밀리 초 단위의 활동 전위 형성에서 시간 단위의 학습까지, 기능적 시간 단위에서도 복잡한 계층적 기능 특성을 가지고 있다.

따라서 복잡한 뇌 신경계의 기능을 밝히기 위해서는 모든 스케일에서 연구가 동시에 진행되어야 한다. 실제로 해마다 뇌 연구에 관련된 6만 편 이상의 논문을 통해서 두뇌 신경계의 기능이 하나씩 밝혀지고 있다. 그럼에도 불구하고 두뇌 신경계가 어떻게 작용하고 있는지에 대한 명확한 해답은 나오지 못하고 있다. 스위스 뇌과학자 Henry Markram 박사의 표현에 의하면,^[3] 그런 연구 결과들은 하나하나 아름다우며 환상적인 연구라고 할 수 있으나 두뇌 전체 중에서 작은 귀퉁이에만 집중하고 있다: 수많은 분자 중에서 몇 개의 특별한 분자를 다루거나, 수많은 두뇌 영역에서 일부 신경세포 혹은 일부 국소 부위만 다루고 있다. 따라서 이렇게 조각 그림을 계속 추가하는

저자약력

한승기 교수는 1984년 KAIST 물리학과에서 이학박사학위를 취득하였고, 그 이후 현재까지 충북대학교 물리학과 교수로 재직 중이다. 그리고 한국계 산뇌과학회 회장을 역임(2014.9-2016.8)하였다.
(skhan@chungbuk.ac.kr)

REFERENCES

- [1] F. Crick, *The Astonishing Hypothesis: The Scientific Search for the Soul*. (Touchstone, New York, 1995).

Fig. 1. (Left) Spatial scales for the brain's different levels of organization span nine orders of magnitude. (Right) Time scales from molecular dynamics to development and aging span nineteen orders of magnitude. (From Ref. [2]).

방식으로는 두뇌 신경계의 전체 그림이 그려지지 못할 것이다. 따라서 기존의 방식을 뛰어넘는 방법으로 획기적인 '두뇌의 대 통일 모형'을 구축하는 시도가 있어야 한다는 주장이 나오고 있다.^[3]

두뇌 네트워크 구축을 위한 인간컨넥톰사업

최근 통계물리학의 핵심 분야로 떠오르는 복잡계 네트워크 연구는 복잡계를 구성하는 모든 요소 간의 연결도를 분석함으로써 복잡계의 구조적 특성과 기능을 밝히는 데 크게 기여하고 있다. 이 방법은 생명체에서 일어나는 대규모 유전자 조절 네트워크와 같은 생명과학, 인터넷을 통한 대규모 정보 및 교통 흐름에도 적용이 가능하게 되었으며, 복잡한 경제계, 인문학계, 그리고 사회과학계의 정보 분석에도 잘 활용되고 있다.^[4,5]

두뇌 신경계에도 복잡계 네트워크 방법을 적용하여 두뇌 신경계의 구조적 특성을 밝히는 연구가 활발히 진행되고 있다.^[6,7] 그림 2에 제시된 바와 같이, 이것은 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 두뇌의 해부학적(anatomical) 연결도로부터 구조적(structural) 네트워크를 구축하는 것이고, 두 번째로는 기능성 MRI(fMRI, functional Magnetic Resonance Imaging), 혹은 뇌전도(EEG)의 시계열(time series)을 이용한 기능성(functional) 네트워크를 구하는 것이다. 두 가지 상이한

Fig. 2. (Top) Structural and functional brain networks can be explored using graph theory through the following four steps: 1) Define the network nodes. 2) Estimate a continuous measure of association between nodes. 3) Generate an association matrix by compiling all pairwise associations between nodes and apply a threshold to each element of this matrix to produce a binary adjacency matrix or undirected graph. 4) Calculate the network parameters of interest in this graphical model of a brain network and compare them to the equivalent parameters of a population of random networks. (From Ref. [6])

방법으로 구한 두뇌 네트워크에 대한 네트워크 분석 방법을 적용하여 두뇌 각 영역에 대한 구조적, 혹은 기능적 역할을 하는 노드 혹은 모듈을 찾아내는 데 많이 활용되고 있다.

최근에 전 세계적으로 활발히 진행되고 있는 인간컨넥톰사업(Human Connectome Project)은 우리 인간 두뇌의 구조적 네트워크를 체계적으로 구하기 위한 사업으로 2009년 미국 국립보건원의 지원으로 시작되었다.^[8,9] 이것은 확산 MRI(diffusion MRI) 장치를 활용하여 두뇌에서 물 분자의 확산 과정을 추적함으로써 대뇌피질에서 축삭(axon)이 집단적으로 연결되는 정보를 얻는 방법이다. MRI 장치로 측정 가능한 복셀(voxel) 크

REFERENCES

- [2] The Human Brain Project: <https://www.humanbrainproject.eu/>.
- [3] M. Waldrop, *Nature* **482**, 456 (2012).
- [4] S. H. Strogatz, *Nature* **410**, 268 (2001).
- [5] A.-L. Barabási, *Linked* (Perseus Pub. 2002).
- [6] E. T. Bullmore and O. Sporns, *Nat. Rev. Neurosci.* **10**, 187 (2009).
- [7] O. Sporns, G. Tononi and G. M. Edelman, *Cereb. Cortex* **10**, 127 (2000).
- [8] The Human Connectome Project: <http://www.humanconnectomeproject.org/>.
- [9] O. Sporns, *NeuroImage* **80**, 53 (2013).

Fig. 3. Scales of anatomical structure and image modality. The image shows the different scales of anatomical structures of interest and the magnification of different image modalities, which can be used to study white matter architecture. Abbreviations: CLSM, confocal laser scanning microscopy; MOST, micro-optical sectioning tomography. (From Ref. [10]).

기가 1 밀리미터이므로, 이 방법으로 구한 두뇌 네트워크는 대략 86만 개 복셀 사이의 연결 지도가 될 것이다.

우리 두뇌는 다중적 크기의 구조를 가지고 있으므로, 각 크기에 맞는 두뇌 네트워크를 구축하기 위해서는 그 크기에 맞는 측정 장치를 활용해야 한다. 그림 3에서 수 밀리미터 단위의 연결도는 확산 MRI로 충분하지만, 그보다 정밀한 마이크로미터 단위의 신경세포 연결도를 구하기 위해서는 공초점 레이저 스캐닝 현미경이나 전자현미경을 활용해야 한다. 그런데 문제는 두뇌 신경계에 있는 1000억 개 신경세포 간의 연결 지도를 구하기 위해서는 무려 100조 개에 이르는 축삭 연결도를 찾아야 한다는 것이다. 만약 한 사람이 이 작업을 모두 수행한다면 100만 개 신경세포 사이의 연결도를 찾아내는 것도 거의 1백만 년이 걸리며 두뇌 신경계 전체로는 1000억 년이 걸리는 작업이 될 것으로 추정한다. 그런데 최근에 재미 한국인 과학자 Sebastian Seung 박사는 아주 흥미로운 아이디어를 제시하였는데, 만약 이 작업을 컴퓨터 게임 방식으로 수십만 명이 동시에 참여하여 수행한다면 신경세포 단위의 뇌 지도를 구축하는 데 획기적으로 효율을 높일 수 있을 것이라는 아이디어다.^[11] 실제로 Seung 박사는 망막 신경세포 네트워크 구축에 이 방법을 성공적으로 적용하였으며,^[12] 앞으로 두뇌 전체 신경계의 네트워크 구축에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

활동하는 두뇌의 대통일 모형 구축

인간커넥텀사업을 통해서 조만간 두뇌 신경계의 네트워크가 완벽하게 구성될 것이며, 또한 모든 시냅스의 결합도 완전히 밝혀지게 될 것이다. 이런 자료는 두뇌 지도로써 두뇌 질환의 진단 등 여러 가지 활용도가 있을 것이다. 하지만, 이러한 자

Fig. 4. Building a neocortical column. The Blue Brain simulation constructs simulated sections of cortex from the bottom up, starting from detailed models of individual neurons. (From Ref. [3]).

료는 정적인 것으로 두뇌가 어떻게 작동하는가에 대한 해답을 주지는 못할 것이다. 2013년 미국 오바마 대통령은 뇌과학을 위한 BRAIN Initiative 사업을 승인하면서, “이 사업의 성과로 활동하는 두뇌의 동적인 그림을 그릴 수 있게 하는 도구를 실험 뇌과학자에게 제공하여 궁극적으로 우리가 어떻게 생각하고, 학습하며 또 기억하게 되는 것인지 알게 해줄 것이다”라고 하였다.^[13] 이 사업을 시작으로 뇌 연구의 주된 관심사는 활동하는 두뇌 신경계의 동적 활동으로 전환이 되었다고 할 수 있다.

그 동안 신경 세포의 전기적인 발화 특성과 리듬의 형성에 대한 연구는 비선형 동역학 분석으로 많은 연구가 진행되었다. 그리고 시냅스 결합에 의해서 신경계에서 발생하는 집단적인 동기화된 신경 발화 특성은 사물의 특징 결합 원리를 설명하는 중요한 기작으로 받아들여지고 있다.^[14] 그러나 이러한 연구는 대부분 소규모 신경계 모형을 대상으로 진행되었지만, 실제 두뇌 신경계에서 정보 처리가 어떻게 일어나는지를 보여줄 수 있는 대규모 신경계의 컴퓨터 시뮬레이션에 대한 동역학 분석

REFERENCES

- [10] H. Axer, *et al.*, Front. Neuroinfo. 5, 1 (2011).
- [11] S. Seung, *Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are* (HMH Books, New York, 2012).
- [12] J. S. Kim, M. J. Greene, A. Zlateski, K. Lee, M. Richardson, S. C. Turaga, M. Purcaro, M. Balkam, A. Robinson, B. F. Behabadi, M. Campos, W. Denk and H. S. Seung, Nature 509, 331 (2014).
- [13] The BRAIN Initiative: <https://www.braininitiative.nih.gov/>.
- [14] W. Singer, Scholarpedia 2, 1657 (2007).

Fig. 5. The Blue Gene/L supercomputer architecture used for the simulation is built using system-on-a-chip technology. The Blue Brain Project's Blue Gene is a 4-rack system that has 4,096 nodes, equal to 8,192 CPUs, with a peak performance of 22.4 TFLOPS. (From Ref. [15]).

은 아주 제한적이었다.

스위스 Markram 박사는 두뇌 신경계에서 정보 처리가 어떻게 일어나는지를 보여주기 위하여 대뇌피질 칼럼 1개의 실제 두뇌 신경계의 활동을 완전히 재현할 수 있는 컴퓨터 모형 구축을 목표로 하는 BBP 사업(Blue Brain Project)을 IBM과 공동으로 2005년부터 추진하였다.^[15] 이 과제를 통해서 구현한 칼럼(밑변 0.5 mm, 높이 1.5 mm) 모형에는 대략 10000개 정도의 신경세포가 포함되어 있다. 그림 4에 묘사된 것처럼 개개의 신경세포는 Hodgkin-Huxley(HH) 신경 세포 모형처럼 신경 세포를 하나의 점으로 다루는 것이 아니라 대략 350개 원통 형태의 구역으로 나누어져 있는 입체적 신경세포 모형이다. 그리고 각 신경 세포에는 평균적으로 7000여 개의 이온 채널이 분포하고 있으며, 그리고 다른 신경세포와 연결되는 시냅스도 약 3000개가 분포되어 있다. 이온 채널과 시냅스의 모형도 HH 신경 세포 모형과 유사한 수리 모형으로 기술되므로, 실제로 입체적인 신경 세포 1개의 시뮬레이션은 대략 10000개 정도의 HH 신경 세포 모형이 결합된 계에 해당하는 계산을 요한다. 따라서 이런 신경 세포가 대략 10000개 정도 모여있는 대뇌피질 칼럼 하나는 대략 1억 개 정도의 HH 신경 세포로 구성된 결합계의 시뮬레이션과 견준다고 할 수 있다.

이 모형의 시뮬레이션으로 칼럼 1개의 신경 발화 특성을 구하는 것은 엄청난 계산을 요하게 되는데, 이를 위하여 IBM에서는 특별히 BGL칩을 개발하였다. 이 칩 하나의 계산 능력은 대략 5.6 Gflop 정도가 되는데, BBP 사업에서는 이러한 칩이 4096개가 들어있는 병렬컴퓨터 BG/L를 주로 사용하고 있는데, 이 병렬컴퓨터 1개의 계산 능력은 무려 22.4 TeraFlop의 성능을 가지고 있다. 입체적으로 구성된 신경 세포 1개에 대한 시뮬레이션을 이 병렬컴퓨터 1대가 맡을 수 있으므로, 10000

Fig. 6. The scale of cortical simulations proposed by the Human Brain Project. The full scale simulation for the complete human brain would require Exaflop (10^{18} flop) computing speed. (From Ref. [3]).

개의 신경세포로 구성된 칼럼 하나의 시뮬레이션에는 대략 10000개 정도의 BG/L 컴퓨터가 동원되었다. 이렇게 정교하게 구성된 신경계에 대한 시뮬레이션은 이전에는 전혀 시도되지 않았던 대규모 계산으로 실제 신경 세포의 발화 특성을 거의 완벽하게 재구성할 수 있으므로 실제 신경계의 실험을 거의 대체할 수 있는 대안으로 뇌과학계에서는 받아들이고 있다.^[16]

BBP 사업을 통해서 얻게 된 성과를 기반으로 Markram 박사는 한 걸음 더 나아가 인간두뇌사업(Human Brain Project)을 EC(European Commission)에 제안하였다.^[2] 이 제안에서 Markram 박사는 2023년까지 두뇌 신경계를 구성하고 있는 1000억 개 신경세포와 100조개의 시냅스 연결을 모두 컴퓨터 모형으로 재구성하는 엄청난 대도전을 제시하였다. 10년간 총 10억 유로의 연구비가 들어가는 이 사업은 EC의 승인을 받아 이미 2013년부터 진행되고 있다. 그림 6의 그래프가 보여주듯이, 이것을 위해서는 한 개의 대뇌피질 칼럼에 소요되는 계산 능력 10 TeraFlop의 거의 십만 배에 해당하는 ExaFlop (10^{18} Flop) 단위의 계산 능력이 소용될 것으로 예측하는데, 이것은 BG/L 병렬 컴퓨터 10억 대에 해당하는 규모이다. 그 이전에 대략 1억 개의 신경 세포로 구성된 생쥐의 두뇌 신경계의 시뮬레이션을 중간 목표로 하고 있는데 이것도 BG/L 병렬 컴퓨터 수백만 대를 동원해야 할 것으로 본다. 하지만 그 동안 컴퓨터 계산 능력의 기하급수적인 증가를 감안하면 이러한 목표

REFERENCES

- [15] H. Markram, Nat. Rev. Neurosci. 7, 153 (2006).
- [16] H. Markram, E. Muller, *et al.*, Cell 163, 456 (2015).

Fig. 7. The spatiotemporal domain of experimental techniques available for the study of the nervous system in 2014 is compared with those in 1988. EEG, electroencephalography; MEG, magnetoencephalography; PET, positron emission tomography; VSD, voltage-sensitive dye; TMS, transcranial magnetic stimulation; 2-DG, 2-deoxyglucose. (From Ref. [17]).

가 허황된 꿈으로 보이지는 않는다.

대통일 모형 구축을 위한 물리학의 역할

미국에서 주도적으로 진행되고 있는 BRAIN Initiative 사업에서는 대통일 모형의 구축에 좀 더 신중한 입장을 취하고 있다. 대통일 모형 구축에 필수적인 실험 결과가 현저하게 부족한 현 시점에서 1000억 개로 구성된 두뇌 신경계 전체를 모형화하기보다는 현실적으로 실현 가능성이 높은 소규모 신경계, 마이크로 회로(microcircuit)를 완전히 모형화하는 것을 목표로 하고 있다.^[13] 이 마이크로 회로에는 대략 100개 정도의 대뇌 피질 칼럼이 복잡하게 연결되어 있다. 대략 100만 개 정도의 신경 세포로 구성되어 있는 이 회로는 두뇌 신경계에서 실질적으로 정보 처리를 할 수 있는 단위라고 생각되고 있다. 두뇌 신경계에는 모두 10만 개 정도의 마이크로 회로가 있으며, 이것을 모두 밝히면 두뇌의 기능은 거의 완벽하게 이해할 것으로 기대한다.

이 목표를 위해서 BRAIN Initiative 사업에서 제일 중점을 두고 있는 것은 100만 개 정도의 신경 세포 활동을 동시에 모니터링할 수 있는 측정 기술의 개발이다. 그림 7에 정리된 도표와 같이, 현재 사용하고 있는 장치로 측정 거리 범위는 마이크로미터에서부터 미터 단위까지, 시간 단위로는 마이크로초에서 수 시간까지 측정이 가능하므로 시간적으로나 공간적으로 두뇌 전체의 활동을 모두 측정 가능할 것으로 보인다. 그러나 실제로 각 실험 장치가 가지고 있는 시간적, 공간적 측정 분해능의 한계 때문에 100만 개 정도의 신경 세포 활동을 동시에

측정하는 것은 많은 어려움이 있다. 예로써, EEG/MEG 장치는 두뇌 신경 전체를 포함할 수 있을 정도의 두뇌 활동을 측정할 수 있지만, 공간 분해능이 좋지 않아서 신경 세포 개개의 활동은 측정 불가능하다. 반면 패치 클램프나 단일 전극을 이용하면 개개 신경 세포의 정확한 발화 활동을 정밀하게 측정할 수 있으나 동시에 많은 신경 세포 활동을 측정하는 것은 불가능하다. 다수의 전극을 사용하는 다중 채널 전극을 활용하더라도 동시에 측정할 수 있는 수는 천 개 미만에 불과하다. 따라서 100만 개의 신경세포로 구성된 마이크로 회로의 활동을 동시에 측정하기 위해서는 기존의 장비가 가지고 있는 한계를 뛰어넘는 획기적인 기술이 개발되어야 할 것이다.

최근에 개발된 광유전학(opto-genesis) 기술은 광 자극을 통하여 신경계의 활동을 조절하고, 또한 역으로 두뇌의 전기적 활동을 광학적 방법으로 측정 가능하다는 점에서 기존의 장비가 가지고 있는 한계를 극복할 수 있을 것으로 기대된다.^[18,19] 현재로서 이 기술은 빛에 반응하는 특별한 유전자를 주입한 특별한 생명체에서만 가능하지만, 빛으로 신경 세포를 자극하는 자극자(actuator)나 신경 세포의 전기적 활동을 감지하는 센서(sensor)를 나노 기술을 통하여 개발할 수 있을 것으로 기대한다. 또 다른 흥미로운 발명은 두뇌를 투명하게 하는 투명한-두뇌(clarity, see-through brains) 기술로써, 이것은 두뇌 외부에서도 비침습적(non-invasive)으로 두뇌 내부의 활동을 광학적으로 측정할 수 있는 기술이다.^[20] 이 기술은 소형 동물에만 적용될 수 있지만, 인간 두뇌에도 적용할 수 있는 방법이 개발된다면, 광유전학 기술과 결합하여 두뇌 전반의 전기적 활동을 동시에 측정할 수 있는 것이 가능하게 될 것이다. 물리학의 광학기술, 나노기술, 그리고 생명과학의 유전공학 기술의 융합적 접목을 통하여 이러한 획기적인 기술 출현을 절실히 기대하고 있다.

한편, 대규모 두뇌 신경계에서 실시간으로 쏟아지는 빅 데이터의 특성을 분석할 수 있는 이론적 방법도 개발되어야 할 것이다. 작은 규모의 신경계에서 발생하는 카오스적 발화 현상, 주기적인 리듬의 형성, 집단적인 신경 발화의 동기화 현상은 비선형 동역학 분석을 통하여 비교적 잘 이해할 수 있다.^[21] 하지만 그림 2와 같이 시공간적 계층적 구조를 가지고 두뇌

REFERENCES

- [17] T. J. Sejnowski, P. S. Churchland and J. A. Movshon, *Nat. Neurosci.* **17**, 1440 (2014).
- [18] K. Deisseroth, *et al.*, *J. Neurosci.* **26**, 10380 (2006).
- [19] J. J. Mancuso, *et al.*, *Exp. Physiol.* **96**, 26 (2010).
- [20] K. Chung, *et al.*, *Nature* **497**, 332 (2013).
- [21] S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos* (Addison Wesley, New York, 1995).

네트워크에서 다양한 두뇌 리듬의 형성, 시공간 패턴의 특성 분석과 분류, 그리고 이런 시공간 패턴을 체계적으로 조절할 수 있는 새로운 이론과 기술의 개발은 두뇌 대통일 모형 구축에 획기적으로 기여할 수 있을 것이다. 그리고 대규모 시뮬레이션 결과 발생하는 시공간 데이터에 대한 시각화 기술, 새로운 네트워크 분석 방법, 그리고 대규모 수리 모형에 대한 최적화 기술도 개발되어야 할 것이다.

지난 20세기 초 물리학계는 엄청나게 쏟아져 나오는 다양한 빛 스펙트럼의 출현으로 겪었던 대혼란을 양자론이라는 획기적인 방법으로 해결한 시점이 있다. 현재 뇌과학에서 시도를 하고 있는 대통일 모형의 구축은 양자론의 발명과는 다른 방법으로 접근해야 할 것이다. 양자론이 환원적으로 개개 원자에 적용되었을 때 성공적이었다면, 두뇌 대통일 모형은 두뇌 신경

계 전체에 적용되었을 때 비로소 그 성과를 보일 것이다. 따라서 단일 원자의 단순성으로 양자론이 연역적인 추론의 결과로써 한순간 완성되었다면, 두뇌 대통일 모형은 그 계의 복잡성 때문에 실험 데이터와 다양한 시뮬레이션 사이의 검증과 피드백을 통해서 서서히 그 모습이 떠오르는 데이터-기반 모형 구축이라고 할 수 있다. 당연히 이 과정은 양자론이 완성되는 과정과는 비교할 수 없을 정도의 시간이 요할 것이다. 또한 이것은 뇌과학, 생명과학, 물리학, 정보과학 등 전 학제적인 협력이 있어야 가능한 과학계 전반의 대도전이라고 할 수 있을 것이다. 조만간 우리나라에서도 이 대도전에 동참할 수 있는 대규모 뇌과학 사업이 진행될 것이며, 우리 물리학계도 다양한 방법으로 기여할 수 있는 기회가 올 것으로 기대한다.