



量子場と脳、その歴史と新展開

西山, 陽大
田中, 成典

(Citation)

科学基礎論研究, 51(1-2):57-73

(Issue Date)

2024

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

本著作物の著作権は著者に帰属します。
クリエイティブ・コモンズ [表示 - 非営利 - 改変禁止 4.0 国際]ライセンス

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100492317>



量子場と脳、その歴史と新展開

西山陽大* 田中成典

Quantum Brain Dynamics: History and New Perspectives

Akihiro NISHIYAMA* and Shigenori TANAKA

Abstract

We aim to describe the history of Quantum Brain Dynamics (QBD), the hypothesis of memory and consciousness in a brain, and argue about recent perspectives in this article. First we introduce several features in memory in a brain distinguished from computer memory. Next we introduce the holographic brain theory proposed by Pribram which describes the mechanism of memory. Furthermore we show quantum field theoretical approach of memory proposed by Umezawa et al.. We consider concrete degrees of freedom in QBD, namely water electric dipole fields and photon fields, and also discuss the feasibility of spontaneous breakdown of rotational symmetry of electric dipoles, where dipoles are aligned in the same direction, in order to describe memory. Next we introduce dissipative quantum model regarding a brain as an open system, and attempt the integration of QBD and holographic theory. Moreover we consider the consciousness emerging as Bose–Einstein condensate, and estimate its critical temperature. Furthermore we mention our opinions against criticisms with respect to decoherence phenomena. Finally we refer to perspectives on QBD towards solving hard problems in conventional neuroscience.

1. はじめに

本稿では量子脳理論について論述する。「量子脳理

論」には様々なレッテルが貼られており、その多くは、それが現実とはかけ離れた想像上の産物であり、生物学的には、あるいは物理学的にも荒唐無稽のモデルであるというものである。しかしながらその歴史を辿ると、Penrose、Umezawa、Takahashi、Yasueといった著名な物理学者たちがその研究に取り組み、数多くの論文が出版されている。現在、脳機能を表現する量子モデルとして最も信憑性の高いと思われるものの一つは、脳内の水と電磁場の結合系を対象とするものであるが、それは物質科学的には極く自然な設定であると思われ、「ニューロンとシナプスによる情報処理」というパラダイムから逸脱していることが脳科学の研究コミュニティの多くから黙殺されている主要な要因と考えられる。しかしながら、こういった「ニューロン・ドクトリン」だけでは説明しきれない部分を「水と電磁場の量子脳モデル」が補うことができる可能性は大いにある。また、物理学的な批判の主要なポイントの一つである量子的デコヒーレンスの問題も、後述

* 神戸大学大学院システム情報学研究科

E-mail: anishiyama@people.kobe-u.ac.jp

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP17H06353, JP18K03825 and JP21K06098. The present work was supported also by MEXT Quantum Leap Flagship Program (MEXT QLEAP) Grant Number JPMXS0120330644. We thank Prof. Tuszynski for fruitful discussions in this work. We thank Dr. Okiyama for providing us with a figure of a microtubule.

本著作物の著作権は著者に帰属します。クリエイティブ・コモンズの「表示-非営利-改変禁止 4.0 国際 (CC BY-NC-ND 4.0)」に基づいて配布されたオープンアクセスの著作物であるため、適切なクレジットを表示し、非営利目的で、改変を加えていなければ、誰でもダウンロード、再利用、複写、転載、または配布することができます。

するように、現実的な物理化学パラメーターの範囲内で回避されうるといふ議論や理論も提案されている。意識とは何か、また、記憶とは何か。そういった科学におけるハードプロブレムの解決に向けて、量子脳理論、特にここで紹介する量子場脳理論は一つの道を提供する。

記憶とは何か？現在でも、脳科学の未解決問題の一つである。記憶はコンピュータメモリとは異なる特徴を持つ [1]。我々が、メロディーや曲を思い出すときの再生順序は決まっており、決して逆再生されないという特徴がある (Sequential pattern)。また、我々は情報の断片が与えられると記憶の自動連想が行われるということを知っている (Auto-associative property)。加えて、記憶は脳の階層の中で処理されており、空間的な伝搬とともに加工されていく (Patterns in a hierarchy)。さらに、我々がヒトの顔を認識する時、角度や距離、影の有無といった変化に関わらず、人物を特定できる (Invariant form)。記憶は、広がりを持った非局在的な特徴を持つ。この性質は Lashley の実験に遡ることになる [2]。それぞれの記憶痕跡の場所を特定する実験として、多数のラットに迷路の経路を学習させたのち、それぞれ異なる場所にある皮質の一部に損傷を与えたのち回復を待って、経路を記憶しているかどうか調べることを考える。その結果、どの一部分を損傷させても経路を記憶していたことが報告されている。ラットは、損傷を受けていない皮質が残っていれば、経路を記憶していることが分かった。記憶は、脳内で広がりを持って存在しており、損傷に対して安定な特徴を示すことを Lashley の実験は物語っている。ラットの大脳皮質の機能分化はほとんどなく、その一部に損傷を受けたとしても損傷を受けていない部分が残っていれば、その部分が損傷部分の機能を補うという特徴を持つ (等能性 [3])。さらに特定の機能が失われるかどうかは、どれだけ広範囲にわたって損傷を受けるかという量による (量作用の原理 [4])。

Pribram は、これらの脳の記憶 (および感知) の特徴を説明する理論として神経ホログラフィ理論を提唱した [5,6]。ホログラフィとは、光の干渉、回折を利用し、3次元の像を記録再生する技術を指す [7]。例えば、レーザー光を利用し、光を2つに分け、一方をある角度、もう一方を物体に反射させたのち別の角度で (厚みを持つ) 2次元平面 (あるいは3次元記録媒体) に入射させ、電場の干渉縞を記録する。この時、平面には、光の振幅・波長だけでなく位相の情報も記録さ

れる。振幅と位相を記録することから、物体のある方向と物体までの距離の情報を持つ3次元像を記録できる。さらにホログラフィはレーザー光の入射角を変えることで同じ記録媒体に複数の情報を記録することができる。すなわち、ホログラフィは記憶の大容量性を説明できる。また、記録したホログラムをバラバラにしたとしてもその一片を取り出し、レーザー光を当てると記録した3次元物体の全体像を再生することができる。この記憶のホログラフィ的特徴は Lashley の実験結果を説明する。すなわち、脳の一部を損傷したとしても損傷を受けていない部分があれば記憶を再生できる。このようにして、記憶の安定性をホログラフィによって説明することが可能である。

Pribram と共同研究を行っていたのが、Jibu および Yasue であり、Ricciardi、Umezawa、Stuart、および Takahashi らの場の量子論で脳の記憶機構を説明しようとするアプローチを発展させた [8,9]。本稿では、脳に対するニューロン・ドクトリンとは異なるアプローチとして、場の量子論によるアプローチ、すなわち量子場脳理論の歴史を振り返るとともに近年の新展開について触れることにする。我々ここでは、ある意味虚心坦懐に、「脳の主要な物質的構成成分である水と電磁場の結合した系が、生理条件下で、量子場としてどのように振舞うか」を問う。物理系を表現するモデル・ラグランジアン (あるいはハミルトニアン) を定義し、その有限温度のダイナミクスを場の量子論の方法で解析してその結果を整理し、記憶や意識などの脳機能をどこまで説明できるか、実験や観察の結果とどの程度整合するかを調べるという立場をとる。先入観を持って早計に批判・判断することなく、理論解析が語る結果に素直に耳を傾け、現実との比較において、取るべきは取り、捨てるべきは捨てる。本稿では、こういった我々のアプローチを基軸とし、量子場脳理論の歴史と現状、そして新たな展開とその展望について概観したい。

2. ニューロン・ドクトリンから微小管および量子場へ

従来の脳科学における記憶の分類は以下のようなものである [10]。記憶は、時間スケールに応じて短期記憶と長期記憶に分類される。短期記憶は、数秒から数分の間保持されるものであり、前頭葉で処理され我々の意思決定と関わっている。長期記憶は、数時間から

一生にわたって保持されるものであり、短期記憶とは処理される場所が異なる。長期記憶には、言葉により表現することができる宣言的記憶と表現することのできないスキルなどの非宣言的記憶がある。宣言的記憶には、エピソード記憶、意味記憶、および空間記憶がある。過去の思い出などのエピソード記憶が一回の体験で保持されるのに十分であるのに対し、言葉の意味および概念に関わる意味記憶、自分の家の場所を記憶するなどの空間記憶はトライアルアンドエラーで数回に分けて訓練して記名しなければならない。宣言的記憶は、内側側頭葉、視床および新皮質に保持される。一方で、習慣などの非宣言的記憶は、扁桃核、線条体および小脳で処理され则认为られている。短期記憶を長期記憶に転換する際には、海馬が必要とされる。

ニューロン・ドクトリンに基づく脳科学において、記憶はシナプス結合のパターンとして理解されるという記述が目立つ。Hebb 則と呼ばれる規則では、ニューロン同士の接合部であるシナプスの可塑性が重要であると主張されており、シナプスにおける信号伝達効率が長期的に変化することが学習のメカニズムとされる。絶え間なく外部から同一の刺激を加えたときにシナプス応答が増大する現象は長期増強と呼ばれている。では、記憶はシナプス結合パターンの組み合わせで説明可能なのだろうか？ また、シナプスを持たない単細胞生物の記憶機構 [11] をどのように説明するのだろうか？ 現在のところ単細胞生物でも可能な記憶の保管場所、情報処理や認知に関わる分子メカニズムはまだ解明されていない。

さらに、ニューロン・ドクトリンの問題点として、エネルギー効率に関するものが挙げられる。2016 年、Deep Mind 社の人工知能 AlphaGo が、囲碁のゲームを人間のプロ棋士と行い、4 勝 1 敗で勝利したことは記憶に新しい。ここで注目したいのはそのエネルギー消費量である。人工知能のエネルギー消費量は、約 250 kW である [12]。それに対し、人間の脳のエネルギー消費量は、約 20 W である。互角の勝負をした人間と人工知能で、なぜこれ程までにエネルギー消費量が異なるのだろうか？ なぜ人間の脳は、ここまで効率的なのだろうか？

単細胞生物でも記憶・学習ができ、かつ高いエネルギー効率を実現する機構として量子の力を利用する必要があるのではないかと？ エネルギー変換器一般に、古典熱機関等に対し、高い変換効率を示す場合は何らかの量子性を活用しているケースが多い（光

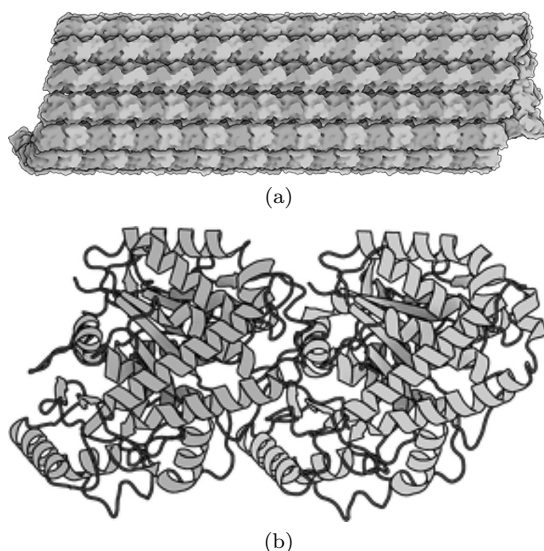


図 1 微小管 (a) およびチューブリン 2 量体 (b)。 (b) 図で濃 (左) : α チューブリン、淡 (右) : β チューブリン。

合成、太陽電池、量子デバイス等)。もし古典的コンピュータで脳のようなエネルギー効率を実現できるのであれば、既にコンピュータサイエンスの分野で実用化されていてもおかしくない。そうでないことが古典論では脳を説明できないことを間接的に示しているのではないだろうか。量子性を利用するアプローチには Penrose-Hameroff アプローチ [13, 14] や Jibu-Yasue アプローチ [8] 等がある。量子性が現れる物理系として、細胞内の微小管が着目されている。微小管は、図 1 に示すように、 α -チューブリンと β -チューブリンからなる 2 量体から構成されており、円筒状の構造をしている。微小管は、細胞内の物質輸送や細胞分裂に関わっている重要な細胞骨格である。この 2 量体は 2 つの双安定な電子状態を持ち、量子ビットとして振る舞うことが期待されている。近年、Craddock らによって、微小管の表面をリン酸化させることによる記憶機構が提案されている [15]。そのメカニズムは、次のようなものである。長期増強によって、 Ca^{2+} イオンが細胞内に入ってくる。 Ca^{2+} イオンは、 Ca^{2+} /カルモジュリン依存性プロテインキナーゼ II (CaMKII) を活性化させる。この CaMKII は、微小管の表面のチューブリン 2 量体をリン酸化させる。リン酸化した微小管は、周囲の微小管と MAP (Microtubule Associated Protein) 接続により、互いに情報伝達を行うことが期待される。微小管をリン酸

化させるアイデアは、単細胞生物でも可能な記憶保持および情報処理の機構である。1つのニューロンには、 10^7 個のチューブリン 2 量体が存在する。チューブリン 2 量体をビットと考え、(たとえ古典ビットであっても) 1 ミリ秒で一つの処理を行うと、1 秒間 1 ニューロン当たり 10^{10} 回の処理が行われる。人間の脳には 10^{11} 個のニューロンが存在すると考えると、1 秒間当たり脳は、 10^{21} 回の処理が可能である。微小管は、周囲の分子に比べれば巨大な電気双極子モーメントを持つ。チューブリン 2 量体の電気双極子の向きが揃っているとき、周辺の水分子の電気双極子も向きが揃った状態になる。すなわち、微小管が周辺の水分子の電気双極子の向きに影響を与える。逆に、水分子 1 つ 1 つの双極子は小さくとも、集団になれば微小管の電気双極子に影響を与えることが期待される。微小管周辺の水の電気双極子からなる系は、水の電気双極子場と光子場からなる物理系と考えることができ、場の量子論という自然科学の基礎理論によって記述される。場の量子論は、微視的な粒子しか記述できない量子力学とは異なり、微視的な自由度と巨視的な物体とを同時に記述できる基礎理論である [16]。すなわち、場の量子論は、微視的なスケールでは量子を記述でき、巨視的なスケールでは量子の集団的な振る舞いを古典場として記述できる。Jibu-Yasue アプローチでは、場の量子論に基づく水と光子の集団的振る舞いに着目する。

3. 量子場脳理論の歴史

量子場脳理論の始まりは、1967 年の Ricciardi および Umezawa の論文に遡る [17]。彼らは、場の量子論における自発的対称性の破れに着目し、記憶が何らかの対称性の破れに伴い出現する真空状態に対応すると考えた。例えば、原子の集団について連続的並進対称性の破れが起こると、質量を持たないフォノンと呼ばれる Nambu-Goldstone (NG) 粒子が生成し、巨視的には結晶が生み出される。また、磁気双極子については回転対称性の破れが起こり双極子の集団が同じ向きを持つようになると、マグノンと呼ばれる NG 粒子が生成し、巨視的には強磁性体が生み出されるといった例が挙げられる。場の量子論において、電場・磁場などの量子場の期待値の異なるコヒーレント状態は、互いに直交しており、物理的に異なる状態を表す。この特性は、ユニタリ非同値と呼ばれ、物質の巨視的状态 (あるいは相) の多様性を記述するのに適してい

る。例えば、物質の固体・液体・気体という異なる状態を記述できる。場の量子論におけるユニタリ非同値により、対称性の破れに伴い出現する相の多様性を記述できる。Umezawa らの理論では、脳を古典論的に扱われるニューロンおよびグリア細胞と場の量子論における量子論的自由度の混合系とみなす。Stuart、Takahashi および Umezawa は量子論的自由度として、皮質子 (コーティコン) と交換ボソンの自由度を考えた [18, 19]。これら自由度に対する対称性の破れに伴い出現する巨視的真空が記憶に対応しており、真空における NG 粒子の生成が記憶の想起に対応していると考えられた。有限数の NG 粒子生成は、巨視的真空を変化させない。さらに NG 粒子は、巨視的真空の安定性を保つための監視役として振る舞う。NG 粒子は質量を持たないため (質量の逆数に比例する) 長距離相関が現れ、巨視的真空である記憶の安定性と空間的に広がりを持つ非局在性が記述される。この段階において、この理論には生化学的に具体的な自由度は与えられておらず、単なる作業仮説に過ぎなかった。

ここで、「脳に対するモデル」とは何か、を考えてみよう。理論物理化学、特に物性物理学や分子科学における「モデル (模型)」には大きく分けて、第一原理的モデルと縮約モデル (さらにそれを簡約化したトイ・モデル) があり、前者は系が与えられれば原子核と電子の自由度を用いてほぼ一意的に書き下せ、相対論的效果を考えなければ、Schrödinger 方程式とハミルトニアン (あるいはラグランジアン) の組として記述される。その場合、そこから導かれる物理量はそのまま実験と比較できる物性値であり、その信頼性は Schrödinger 方程式 (あるいはそれと等価な方程式) が解かれた近似の精度に依存する。一方、縮約モデルやトイ・モデルは主に現実世界の「本質」を物理的に把握する目的に使われ、解析結果と実験・観測結果の振舞いの類似性を照らし合わせることで、適宜パラメーターのチューニングなどを行う。上で述べた Umezawa らのモデルは後者の範疇に属するものであり、そこで目指されているものは脳機能、とくに記憶機構の本質の記述である。もしそこで、量子場脳理論に見込みがあるということならば、次に脳を物質と見たときの第一原理的モデルを追及する動機が生まれる。適切な対象を定めた第一原理的モデルが精度良く解かれれば、実験・観測値との対応のみならず、未知の事象に対する予言能力も期待できる。但しそこでは、どのような密度や温度、波長域・振動数帯、ある

いは初期条件・境界条件でそのモデルを解析するかという点も重要で、例えば「水と電磁場の結合系」は、脳のモデルにもなれば、電子レンジのモデルにもなる。

ここで、Umezawa らの貢献とはほぼ同時期に行われた Fröhlich らによる研究 [20, 21] も紹介しよう。Fröhlich は生体内における何らかの電気双極子の秩序状態を記述する模型を提案した。Fröhlich 理論は、細胞膜における極性を持つ双極子同士の量子相互作用に基づくものである。秩序状態形成には、いくつかの前提条件が必要である。すなわち、a) 電気双極子の系に加えられるエネルギーが閾値を超え、双極子同士の同期が起こること、b) 細胞の膜電位が十分大きいこと、c) 振動している双極子の非線形相互作用により準安定な非平衡状態が実現すること、が必要である。外部から供給されたエネルギーは単一の強い双極子励起モードを生成させる。この時、おおよそ 0.1–1 THz の周波数を持つ振動モードが実現されると考えられる。双極子の相互作用は、長距離の相関を引き起こし、双極子集団が巨視的な単一の振動双極子として振る舞うことになる (Fröhlich 凝縮と呼ばれる)。さらに、1976 年には Davydov と Kislukha が、タンパク質の α ヘリックス構造に沿って伝搬する波形が維持された波、すなわちソリトンを提案した (Davydov ソリトンと呼ばれる) [22]。Fröhlich 凝縮と Davydov ソリトンは、ある等価なハミルトニアンを持つ Schrödinger 方程式のそれぞれ静的および動的な側面として現れる [23]。

1980 年代に入ると、Del Giudice らによって、場の量子論を用いて生物系を記述しようとする試みが行われた [24–27]。特に、水分子の電気双極子と光子系に着目し、レーザー解を求める理論が提案されている [26]。また、生物系における Bose–Einstein 凝縮 (Bose–Einstein Condensate: BEC) の可能性が提案され、量子の自由度を集団的に単一の存在として記述しようとする試みは非常に興味深い [27]。さらに、同時期に Marshall は意識に対する BEC を提案している [28]。

1990 年代になり、Jibu および Yasue により物質的に具体的な量子の自由度が与えられることになる。それまでコーティコンや交換ボソンと呼ばれていたものに、それぞれ水分子の電気双極子の場と光子の場という具体的な自由度を与えることが提案された [29, 30]。水分子は、全体的には電氣的に中性であるが、局所的には、プラスとマイナスの極を持つ電気双極子と見做

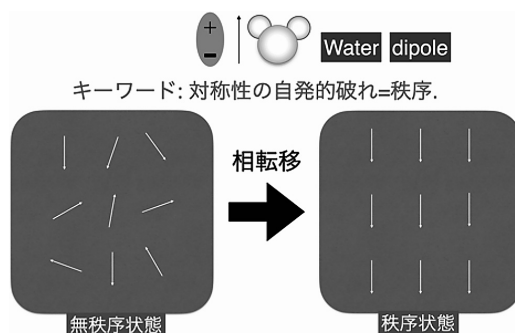


図2 水分子の電気双極子。無秩序から秩序へ。

せる (図2)。水分子は、互いに引き寄せ合ったり、斥け合ったりしている。空間的に分布する水分子集団を、近似的に電気双極子場で記述する。また、電気双極子同士は、電磁場あるいは光子を仲介して互いに相互作用することから、光子場が現れる。量子場脳理論とは、水の電気双極子場 (ポラリトン) の量子電磁力学に他ならない。これらの量子的自由度と細胞内微小管とは互いに相互作用し合うことが期待される。細胞内の微小管は大きな電気双極子の系と見做せる。これら微小管近くの水分子は、向きを揃えた秩序だった振る舞いをすると考えられる。微小管は、水分子の電気双極子の向きが揃った巨視的秩序を生み出す。この秩序は水分子の回転対称性の破れにより現れる巨視的真空を表し、質量を持たない Nambu–Goldstone (NG) ボソンの長距離相関によって維持されると考えられる。量子電磁力学において実効的な結合定数が十分大きい場合には、巨視的真空は摂動論的真空よりもエネルギーが低い [31, 32]。対称性の破れに伴い出現する NG ボソンは光子場の縦波成分に吸収されることで光子は質量を得る (Higgs 機構)。Higgs 機構により質量を持った光子はエヴァネッセント光子と呼ばれる。質量を持つため、光子は脳に局在できると考えられる。また逆に、向きを揃えた水分子集団も微小管の電気双極子に影響を与える。一つ一つの水分子の電気双極子は小さくとも集団になることで微小管に影響を与えることができると考えられる。微小管と水分子–光子は互いに影響を与え合うと考えられる。

さらに、量子場脳理論では、微小管内の水分子の電気双極子と光子場により生成される共同的自然放射である超放射現象が提案されている [33]。水の電気双極子について 2 準位系 (すなわち回転自由度について基底状態と第一励起状態で展開) を考え、光子場と

結合させる。励起状態が基底状態に遷移することで光子が放出される。電気双極子の密度が十分大きく、考えている系の大きさが放射される光子の波長より十分小さい場合で、 N 個の励起状態にある電気双極子が量子的重ね合わせ状態にある場合を考える。互いに重ね合わせ状態にある電気双極子は、電気双極子が 1 つある場合の自然放射の時間スケール τ の $1/N$ 倍の時間スケールで放射する [34, 35]。 N 個の電気双極子が $1/N$ 倍の時間スケールで励起状態から基底状態に遷移するとき、放射の強度は電気双極子が 1 つしかない場合と比べて N^2 倍になる。まさに一瞬の閃光である。¹ Jibu らは、さらに超放射が非線形性により微小管内を減衰せずに伝搬する現象が存在すると考えた。自己透明化現象と呼ばれるこの機構は、熱的ノイズの影響を受けない超放射の発生に重要な役割を果たすと考えられる。Jibu らは、超放射のコヒーレント光を用いて、Pribram が提案した脳内におけるホログラフィ理論を説明しようと試みている。すなわち、量子場脳理論とホログラフィの統合である。ホログラフィの干渉縞が量子場脳理論の枠組みでどのように時間発展するのかは文献 [37] で与えられる。さらに、Jibu および Yasue は量子場脳理論における光子の量子トンネル効果を提案した [38]。2 つの系の質量を持つ光子の波動方程式を考え、互いの波動関数を結合させる。この時、2 つの系で波動関数の位相差があれば、光子のトンネル効果が生じる (Josephson 効果)。光子のトンネル効果は、インコヒーレントな障壁で阻まれた 2 つのコヒーレント領域間の情報伝達の役割を果たすと考えられる。超放射と光子のトンネル効果は、脳内の離れた領域間の情報伝達を行い、統合された意識を実現するために採用することができるかもしれない。

同時期に Vitiello によって、記憶の多様性と大容量性を説明する散逸量子模型が提案された [39, 40] (次節参照)。水分子の電気双極子が揃った巨視的真空でどのようにして記憶の多様性を説明するのだろうか？ Vitiello は、対称性の破れにより生じた NG ボソンを用いてスクイーズドコヒーレント状態と呼ばれる特殊

なコヒーレント状態が生成されると考えた。脳を常に外部の系とエネルギーと物質をやり取りしている開放系と考える。脳が開放系の時、NG ボソンのハミルトニアンは自由度が 2 倍になる。外部の系とエネルギーのやり取りをして摩擦により減衰する調和振動を考えたとき、減衰する解だけでなく増幅される解も考える。この減衰と増幅解を与えるエルミートなハミルトニアンは自由度が 2 倍になる。自由度が 2 倍になった NG ボソンの固有状態として 2 モードスクイーズドコヒーレント状態を作ることができる。(波束が $\langle(\Delta p)^2\rangle \leq \frac{1}{2}$ あるいは $\langle(\Delta x)^2\rangle \leq \frac{1}{2}$ を満たす波をスクイーズド波と呼ぶ。) NG ボソンのスクイーズドコヒーレント状態は、作り方が無限通り存在する。それぞれのコヒーレント状態が、それぞれの脳の記憶に対応しているため、作り方が無限通り存在するコヒーレント状態は巨大な容量と多様性を説明する。このアプローチは、上に述べたホログラフィにより大容量性を説明するアプローチとは異なる。

4. 記憶機構-散逸量子模型とホログラフィ理論

この節では、記憶機構の 2 つのシナリオ、すなわち散逸量子模型およびホログラフィ理論について述べる。

4.1 散逸量子模型

この節では、Vitiello によって提案された散逸量子模型による記憶機構について述べる [39, 40]。外部から脳に入力された信号は、神経細胞まで到達した後、その周辺の水分子の向きを揃える、すなわち対称性の破れを引き起こす。対称性の破れにより、水の電気双極子の向きが全て揃っている巨視的真空状態が生み出される。ところが、Umezawa らによって提案されたこの真空状態は、単一の状態を表すため、多様な記憶形成が行われないうに見える。

そこで Vitiello は、次のような機構を提案した。対称性の破れた状態では、質量を持たない Nambu-Goldstone (NG) 粒子 (dipole wave quanta: DWQ) が発生する。この NG 粒子の生成および消滅演算子を $A_\kappa^\dagger, A_\kappa$ と表す。(ここで κ は、運動量等の添字である。) 次に、脳を不可逆な時間発展をする有限温度系であると考え。有限温度系を考えたとき、Thermo Field Dynamics の形式では、自由度が 2 倍になる [41]。

¹ Del Giudice および著者らの模型の計算では、超放射の時間スケール τ/N は 0.2 ps 程度と計算される [36]。この時間スケール $\tau/N = \frac{3}{2(ed_e)^2 k^0 L(N/V)}$ の関数形は、Jibu らの文献 [33] と一致する。ここで、 $2ed_e$ は水分子の電気双極子、 e は素電荷、 $d_e = 0.2 \text{ \AA}$ 、 $L = 1 \text{ }\mu\text{m}$ は微小管の長さ、 $k^0 = 4 \text{ meV}$ は 2 準位近似のエネルギー差、 $N/V = 3.3 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ は水分子の密度である。

$$A_\kappa \rightarrow A_\kappa \times \tilde{A}_\kappa. \quad (1)$$

ここで、 $\tilde{A}$ は、熱浴あるいは環境の自由度を記述する。自由度を倍化することにより、物理系と環境の相互作用を記述することができる。このとき、 $\{A, \tilde{A}\}$ は、閉じた量子系を記述している。

相互作用していない場合の NG ボソンのハミルトニアンは、

$$H_0 = \sum_{\kappa} \Omega_{\kappa} (A_{\kappa}^{\dagger} A_{\kappa} - \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}), \quad (2)$$

と表すことができる。ここで Ω_{κ} は振動数であり、 $\hbar = 1$ とした。右辺第 2 項の符号がマイナスであるのは、物理系 A から出ていくエネルギー束は、系 $\tilde{A}$ に入っていくエネルギー束を表すためである。系 A と $\tilde{A}$ の数演算子をそれぞれ $N_{A_{\kappa}} \equiv A_{\kappa}^{\dagger} A_{\kappa}$ および $N_{\tilde{A}_{\kappa}} \equiv \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}$ とする。数演算子の同時固有状態を $\{|\mathcal{N}_{A_{\kappa}}, \mathcal{N}_{\tilde{A}_{\kappa}}\rangle\}$ と表す。(ここで、 $\mathcal{N}_{A_{\kappa}}, \mathcal{N}_{\tilde{A}_{\kappa}} \geq 0$ の整数である。) 消滅演算子 A_{κ} および $\tilde{A}_{\kappa}$ が作用したときに消滅する真空を $|0\rangle_0 \equiv |\mathcal{N}_{A_{\kappa}} = 0, \mathcal{N}_{\tilde{A}_{\kappa}} = 0\rangle$ とする。 $(A_{\kappa}|0\rangle_0 = \tilde{A}_{\kappa}|0\rangle_0 = 0)$ 真空 $|0\rangle_0$ にハミルトニアン H_0 を作用させると、エネルギー固有値が 0 になることが分かる。

次に、式 (2) で表されるハミルトニアンのエネルギー固有値が 0 になる状態を考える。その状態とは、

$$|0\rangle_{\mathcal{N}} = |\mathcal{N}_{A_{\kappa}}, \mathcal{N}_{\tilde{A}_{\kappa}}\rangle, \quad \mathcal{N}_{A_{\kappa}} = \mathcal{N}_{\tilde{A}_{\kappa}}, \quad (3)$$

で表される。この状態は、次のスクイーズドコヒーレント状態で与えられる [16]。

$$|0\rangle_{\mathcal{N}} = \exp(iG(\theta))|0\rangle_0 \\ = \prod_{\kappa} \frac{\exp(-(\tanh \theta_{\kappa}) A_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger})}{\cosh \theta_{\kappa}} |0\rangle_0. \quad (4)$$

ここで、 $G(\theta) = i \sum_{\kappa} \theta_{\kappa} (A_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger} - A_{\kappa} \tilde{A}_{\kappa})$ はエルミート演算子であり、 $\exp(iG)$ はユニタリ変換であるため ${}_{\mathcal{N}}\langle 0|0\rangle_{\mathcal{N}} = 1$ と規格化されている。さらに、 θ_{κ} は $\mathcal{N}_{A_{\kappa}}$ と次の関係式を満たす量である。

$$\mathcal{N}_{A_{\kappa}} = {}_{\mathcal{N}}\langle 0|A_{\kappa}^{\dagger} A_{\kappa}|0\rangle_{\mathcal{N}} = \sinh^2 \theta_{\kappa}. \quad (5)$$

すなわち、 θ のセットは、 $\mathcal{N}$ のセットと関連している。スクイーズドコヒーレント状態は、自己相似図形であるフラクタルに対応している [42, 43]。スクイーズドコヒーレント状態に NG ボソンの消滅演算子を n 回

作用させたものは、フラクタル図形を n 回拡大したものを表示させることに対応する。また、

$$\exp(-\tanh \theta_{\kappa} A_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger}) |0\rangle_0 \\ = (1 - \tanh \theta_{\kappa} A_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger} + \cdots) |0\rangle_0, \quad (6)$$

$$A_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger} |0\rangle_0 = |A_{\kappa}, \tilde{A}_{\kappa}\rangle, \quad (7)$$

と展開できることから、スクイーズドコヒーレント状態は、物理系と環境の量子もつれ状態であることが分かる。

異なるセット $\mathcal{N} \neq \mathcal{N}'$ に対応する状態 $\{|0\rangle_{\mathcal{N}}\}$ および $\{|0\rangle_{\mathcal{N}'}\}$ は、次式のように体積無限大の極限で互いに直交していることを示すことができる。

$${}_{\mathcal{N}}\langle 0|0\rangle_{\mathcal{N}'} \rightarrow 0, \quad (V \rightarrow \infty) \text{ for } \mathcal{N} \neq \mathcal{N}'. \quad (8)$$

上の関係もユニタリ非同値の例である。すなわち、異なる θ セットあるいは $\mathcal{N}$ セットのスクイーズドコヒーレント状態を採用すれば、互いに直交する無限の真空状態を作り出すことができる。多様なスクイーズドコヒーレント状態は、それぞれの記憶に対応している。(ここで、記憶の想起は、スクイーズドコヒーレント状態からの NG ボソンの励起に対応している。) このことから散逸量子モデルは、記憶の多様性と大容量性が説明できるとされる。

上記のスクイーズドコヒーレント状態は、相互作用により時間発展する。全ハミルトニアンと相互作用ハミルトニアンを

$$H = H_0 + H_I, \quad (9)$$

$$H_I = i \sum_{\kappa} \Gamma_{\kappa} (A_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger} - A_{\kappa} \tilde{A}_{\kappa}), \quad (10)$$

とする。ここで、 Γ_{κ} は記憶の寿命に関する減衰係数である。相互作用ハミルトニアンは、真空状態を差 $\mathcal{N}_{A_{\kappa}} - \mathcal{N}_{\tilde{A}_{\kappa}}$ を 0 に保ったまま変化させる、すなわち、多様な真空の間を時間発展させる演算子となっている。時間 t における状態 $|0(t)\rangle$ は、

$$|0(t)\rangle_{\mathcal{N}} = \exp(-iHt) |0\rangle_{\mathcal{N}} \\ = \prod_{\kappa} \frac{1}{\cosh(\Gamma_{\kappa} t - \theta_{\kappa})} \\ \times \exp(\tanh(\Gamma_{\kappa} t - \theta_{\kappa}) A_{\kappa}^{\dagger} \tilde{A}_{\kappa}^{\dagger}) |0\rangle_0, \quad (11)$$

と計算できる。状態 $|0\rangle_{\mathcal{N}}$ は状態 $|0(t)\rangle_{\mathcal{N}}$ へと時間

発展するが、時間発展後もスクイーズドコヒーレント状態であることが分かる。(ここで、 $t \neq 0$ に対し、 $\mathcal{N}\langle 0|0(t)\rangle_{\mathcal{N}} = 0$ である。また、 $t \neq t'$ に対し、 $\mathcal{N}\langle 0(t)|0(t')\rangle_{\mathcal{N}} = 0$ である。) スクイーズドコヒーレント状態は、量子もつれ状態である。量子もつれ状態は、神経活動の同期性を生み出すと期待される。この量子状態に対し、古典的な単位であるニューロンは、ある種の観測者と見なせるが、量子もつれ状態であるスクイーズドコヒーレント状態を観測することができると考えられる。この模型では、スクイーズドコヒーレント状態の情報は、ニューロンのダイナミクスへと転移していくと考えられる。ここで、観測とは量子的重ね合わせ状態が、ニューロン・グリア細胞などの比較的マクロな古典系と接触し、一つの状態に確定することを指すといった程度の意味であり、Penrose-Hameroff 理論 [13, 14] のように波動関数の客観的収縮と意識を結びつけることを意図するものではない。

4.2 ホログラフィと量子脳

この節では、Pribram によって提案された Holographic brain theory [5, 6] と Jibu および Yasue の量子場脳理論との統合について述べる。ホログラフィを用いたアプローチは、前節の散逸量子模型とは異なるものである。著者らの採用した理論的手法と導出される結果を図 3 に示す。量子多体系のダイナミクス、エントロピー生成、超放射、自発的対称性の破れ、およびホログラフィなどの現象へと展開することができる。

Jibu および Yasue と Pribram は共同研究を行っていた。Jibu らは 1994 年にホログラフィ説と量子場脳理論との組み合わせに言及している [33]。ホログラフィ実現のためには、レーザー光といった単色性、高いエネルギー密度、揃った位相を持つコヒーレント光が必要である。量子場脳理論では、どのようなコヒーレント光を採用するのだろうか？

Jibu らは、コヒーレント光として、量子場脳理論の模型における超放射の解を採用しようとした。超放射は、Dicke により提案された共振器を必要としないコヒーレント光を表す [34]。電気双極子を場の量子論で記述する際、双極子のエネルギー準位として基底状態と第一励起状態の 2 準位系を考えることができる。(例えば、回転自由度について角運動量の 2 乗 $\mathbf{I}^2 = 0$ の基底状態と $\mathbf{I}^2 = 2$ の第一励起状態を採用する方法

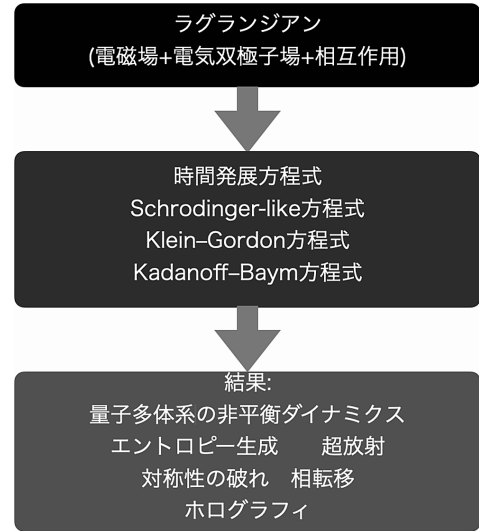


図 3 理論的手法および結果。

があるが、この場合 2 準位のエネルギー差 k^0 は水分子の慣性モーメント I (3 次元の慣性モーメントの平均値) を用いて $k^0 = \frac{1}{2I} (2 - 0) = \frac{1}{I} = 4 \text{ meV}$ (波長 $310 \text{ } \mu\text{m}$) である [26, 36]。) N 個の電気双極子の系の大きさが、2 準位のエネルギー差 k^0 に対応する光子の波長に比べて非常に小さく、電気双極子の密度が互いに量子重ね合わせ状態を形成する程十分大きいとき、超放射を議論できる。 N 個の電気双極子が、全て励起状態にあるところから、互いに相関し合いながら基底状態に緩和する。このとき、緩和時間 τ_R は、 $\frac{1}{N}$ 倍に比例し、電気双極子の密度 N/V が大きいほど、小さい時間スケールで緩和する。 N 個の電気双極子が、 $\frac{1}{N}$ の時間スケールで緩和するとき、観測される超放射の強度は N^2 に比例する。

超放射を引き起こす量子系として、微小管内の水分子を採用する [33, 36]。著者らの採用する模型では、電気双極子場の期待値 $\bar{\psi}_s$ (基底状態) と期待値 $\bar{\psi}_\alpha$ (第一励起状態、 $\alpha = 0, \pm 1$) の時間発展方程式は、以下となる。

$$\left(i\frac{\partial}{\partial x^0} + \frac{\nabla_i^2}{2m}\right)\bar{\psi}_s = -\frac{2ed_e i}{\sqrt{6}} \sum_{\alpha=0,\pm 1} [-\alpha(E_1 + i\alpha E_2) + \sqrt{2}(1 - |\alpha|)E_3] \bar{\psi}_\alpha, \quad (12)$$

$$\left(i\frac{\partial}{\partial x^0} + \frac{\nabla_i^2}{2m} - \frac{1}{I}\right)\bar{\psi}_\alpha = -\frac{2ed_e i}{\sqrt{6}} \times [\alpha(E_1 - i\alpha E_2) - \sqrt{2}(1 - |\alpha|)E_3] \bar{\psi}_s. \quad (13)$$

ここで、水分子の質量は m 、電気双極子モーメントは $2ed_e$ 、素電荷 e 、 $d_e = 0.2 \text{ \AA}$ 、電場 E_i ($i = 1, 2, 3$) であり、 x^3 方向の電場 E_3 の時間発展方程式は、

$$\begin{aligned} & [(\partial^0)^2 - (\partial^1)^2 - (\partial^2)^2] E_3 \\ &= -\frac{\partial^2 \bar{\mu}_3}{\partial (x^0)^2} + \text{量子揺らぎ} \\ &= \frac{\bar{\mu}_3}{I^2} + \frac{8(ed_e)^2}{3I} Z_0 E_3 + \text{量子揺らぎ}, \quad (14) \end{aligned}$$

ここで、 $\bar{\mu}_3$ は x^3 方向の電気双極子密度、 Z_0 は占有数の差 $Z_0 = |\bar{\psi}_0|^2 - |\bar{\psi}_s|^2$ で与えられる。上記の方程式を用いて超放射解を導出することが可能である [36, 37]。微小管の長さ $L = 1 \text{ \mu m}$ を採用し、超放射の振幅 $\epsilon_3(x^0)$ を計算すると、その時刻 x^0 依存性は次式で与えられる。

$$\epsilon_3(x^0) = \frac{\sqrt{3}}{2ed_e} \frac{1}{\tau_R} \left[\cosh \left(\frac{x^0 - \tau_0}{\tau_R} \right) \right]^{-1}. \quad (15)$$

ここで、 $\tau_R = \frac{3/L}{2(ed_e)^2 k^0 N_w/V}$ および τ_0 はある時定数である。水分子の密度 $N_w/V = 3.3 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ を代入すると、 $\tau_R = 0.2 \text{ ps}$ になる。 $(L = 10 \text{ \mu m}$ の場合は、 $\tau_R = 0.02 \text{ ps}$ である。) 上式の解は、著者らの模型を用いて導出されたものであるが、Jibu らの解と係数を除いて一致している。ただし、Jibu らはエネルギー差 $k^0 = 200 \text{ cm}^{-1} = 25 \text{ meV}$ を採用しており、Del Giudice らや著者らの想定する $k^0 = 4 \text{ meV}$ とは異なる。

ホログラフィ理論において、超放射コヒーレント光は、微小管の両側から放射されたのち、一方が外部の情報を含む記録すべき物体に衝突したのち反射することを想定する。物体に相当するものは、外部の情報を含むリン酸化された微小管 [15] あるいは、濃淡のあるイオン濃度分布かもしれない [6]。物体により反射された光:物体光 $o(x, y)$ と別の角度から入射したもう一方の光:参照光 $r(x, y)$ の干渉縞を考えることができる。ここで、 (x, y) は微小管周辺の 2 次元座標を表したものである。著者らの模型では、干渉縞と光の透過率の関係を記述することができる [37]。物体光と参照光の干渉により、電場 $\mathbf{E}(x, y)$ は、次式で与えられる。

$$\mathbf{E}(x, y) = r(x, y) + o(x, y). \quad (16)$$

このとき、電気双極子ベクトル $\mu = (\mu_1, \mu_2, \mu_3)$ は、電場 $\mathbf{E}$ に比例する ($\mathbf{E} \propto \mu$)。電場に対する時間発展方程式 (Klein-Gordon 方程式) から、光の透過率 T は、

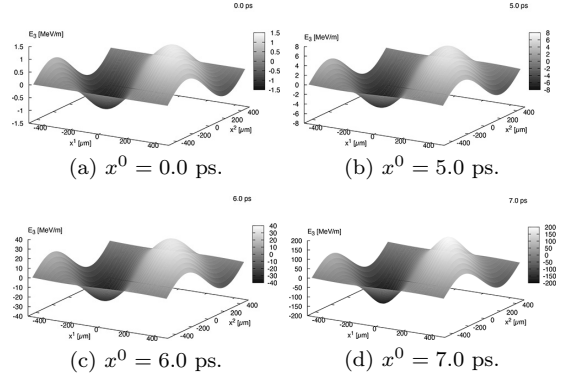


図 4 電場分布 E_3 の時間発展。(a) 時刻 $x^0 = 0.0 \text{ ps}$, (b) 時刻 $x^0 = 5.0 \text{ ps}$, (c) 時刻 $x^0 = 6.0 \text{ ps}$ および (d) 時刻 $x^0 = 7.0 \text{ ps}$ 。

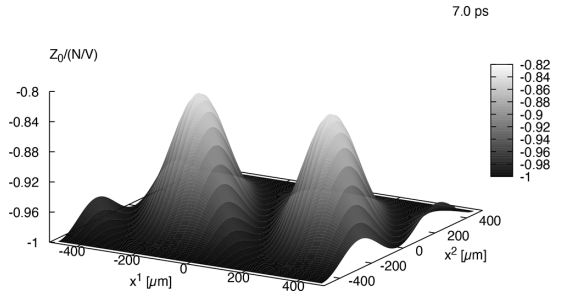


図 5 占有数の差 $Z_0/(N_w/V)$ 。(水の密度で規格化。)

$$\begin{aligned} T &\sim |\mu_3|^2 + \dots \\ &\sim |E_3|^2 \sim |r + o|^2 + \dots \\ &= |r|^2 + |o|^2 + r o^* + r^* o + \dots, \quad (17) \end{aligned}$$

($*$ は複素共役) と書くことができる。ホログラムの透過率 T が、電場の干渉縞の 2 乗に比例する項を含むことが分かる (記憶の記名) [37]。

記憶の再生 (想起) は、ホログラムに参照光を記名したときと同じ角度で入射させれば良い。このとき、再生像は透過率 T と参照光 r の積で与えられる。すなわち、

$$rT \sim r|r|^2 + r|o|^2 + r^2 o^* + o|r|^2 + \dots, \quad (18)$$

と記述できる。この関係式で $o|r|^2$ に相当するのが、想起される記憶に対応している。

さらに著者らは、干渉縞に光子を供給した場合の時間発展を追跡した [37]。光子を供給すると干渉縞の波形を維持したまま、コントラストが増大することが示された (図 4)。図 5 に時刻 7.0 ps における第一励起状

態と基底状態の水分子の占有数の差 $Z_0 = |\bar{\psi}_0|^2 - |\bar{\psi}_s|^2$ を示す。電場が大きいのほど、 $Z_0/(N_w/V)$ は 0 に近くなることが分かる。このとき、 $-Z_0/(N_w/V)$ は、電場の 2 乗 $|E_3|^2$ に依存する。透過率 T は、電場の時間発展方程式 (14) の Debye 遮蔽項 $\frac{8(ed_e)^2}{3I} Z_0 E_3$ により、 E_3 の係数 ($-Z_0$) に反比例して変化する。すなわち透過率 $T \sim 1/(-Z_0)$ のコントラストが増大し、ホログラム再生の際の再生像の強度が増大する。ただし、長期的に記憶を保持するためには、三角関数で記述されるホログラムの干渉縞ではなく、空間的にステップ関数的な、すなわち電気双極子の向きがランダムな状態と全ての双極子が揃った対称性の破れを伴う状態が交互に分布するホログラムを採用する必要がある。光学的情報を含むホログラムに参照光が照射され、空間を伝搬しながら情報処理を行い、ステップ関数的なホログラムに移行する過程まで追跡できるかどうかは今後の課題である。

ホログラフィ理論を採用すれば、記憶の非局在性を説明できるほか、様々な記憶の特性を説明できるかもしれない。脳をニューロン・グリア細胞などの古典系と量子的自由度の混合系と考える。ニューロン発火に超放射光照射が伴うと考えると、ニューロン発火に順序があるように超放射光照射に順序が生じることから Sequential pattern の特性が説明できると考えられる。ホログラムに超放射光が照射され、像が再生されるとともに再生像に反射した光が別のホログラムに照射され、それらが繰り返されると Auto-associative property の説明が可能となる。もし、記憶が光学的情報として与えられるのであれば、ホログラフィ理論における情報処理およびフィルタリングの技術を量子場脳理論に適用することができる。微小管から周辺ホログラムに対し、コヒーレント光である超放射光を照射することで像を再生する。その像に別の微小管から超放射光を照射し干渉縞を伴うホログラムを別の場所に作成する。そのホログラムにさらに別の微小管から超放射光を照射する。これを繰り返すことにより、記憶が脳内を移動する。すなわち、光学的情報処理を利用することで、記憶が階層に沿って脳全体に拡散していく機構を説明できるかもしれない (Patterns in a hierarchy)。フィルタリングによって光学的情報処理を実行することで、外部情報の冗長性の排除、知識の一般化および抽象化が行われることが期待される (Invariant form)。また、記憶のメカニズムのみなら

ず、思考プロセスを追跡できるかもしれない。

近年注目を集めている量子認知 [44–49] との関連に言及することもできる。量子認知は、意思決定の数理モデルとして量子力学的アプローチを採用しようとする試みを表す。(分子レベルで実際の量子的自由度を与えているわけではない。) 認知科学の主流では、量子認知と量子場脳理論は切り離して論じられる。量子場とホログラフィ理論を採用することで、量子認知に用いられる量子状態に対し、具体的な物理的自由度を与えることができる。例えば、光子が同時に 2 つの経路を通る重ね合わせ状態にあるとする。この光子が 2 つのホログラムを透過するとした場合、再生像が 2 つ存在する重ね合わせ状態にあると考えることができる [50]。ホログラフィを採用することで、重ね合わせ状態や量子もつれといった意思決定に関連する量子力学的数理モデルの物理的実体を与えることができると考えられる。

5. Bose–Einstein 凝縮体としての意識

なぜ意識は一つに統合された性質を持つのであろうか？この節では、統合された意識の本質として、Bose–Einstein 凝縮 (Bose–Einstein Condensate: BEC) を採用することを提案する [28, 30, 51]。

光子による BEC が実現するかどうかは、光子の密度と有効質量を評価することで議論できる。希薄 Bose 気体の BEC の臨界温度は例えば文献 [52] で与えられる。量子場脳理論で臨界温度を評価すると次のような値となる。

$$T_c = \frac{2\pi}{\mu} \left(\frac{1}{2.612} \cdot \frac{N_{ph}}{V} \right)^{\frac{2}{3}} \sim 210 \text{ K}, \quad (19)$$

ここで、 $\frac{N_{ph}}{V} = 6.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ は 310 K の熱平衡状態における光子熱輻射密度、 $\mu = 13 \times 4 \text{ meV} = 52 \text{ meV}$ は電場の Debye 遮蔽の大きさから見積もった光子質量を表す [36]。Klein–Gordon 方程式の Debye 遮蔽項から、

$$\begin{aligned} \mu &= 4ed_e \sqrt{\frac{N_w/V}{6k^0}} \times k^0 \\ &= 13 \times 4 \text{ meV} = 9.3 \times 10^{-38} \text{ kg}, \end{aligned} \quad (20)$$

と求められる。(ここで、 $k^0 = 4 \text{ meV}$, $e = 0.3$ は素電荷、 $d_e = 0.2 \text{ \AA}$ および $N_w/V = 3.3 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ であ

る。) 臨界温度は、光子が獲得した質量 μ を 52 meV として求めたものであるが、密度 1 g/cm^3 の水分子全てがコヒーレント状態にある場合の値である。質量 μ は、

$$\mu^2 \propto \frac{N_w}{V}, \quad (21)$$

となるため、コヒーレント状態にある水分子の密度 $\frac{N_w}{V}$ が小さくなれば、 μ は小さくなり、臨界温度 T_c は上昇する。50% の水分子がコヒーレント状態にあるときには、臨界温度は $T_c \propto \frac{1}{\mu} \propto \sqrt{\frac{1}{N_w/V}} = 210 \times \sqrt{2} \text{ K} = 300 \text{ K}$ となり、室温で実現すると見積られる。直観的には、コヒーレント状態にある水分子の割合が小さく光子の質量 μ が小さい方が、光子が互いに運動しやすくなり臨界温度が上昇するが、光子の質量が小さくなりすぎると光子の伝搬速度が光速に近くなり、互いに集まりにくくなることで光子密度 N_{ph}/V が低下し臨界温度が下降することが予想される。なお、上で光子密度として熱輻射の平衡値を用いたが、実際の脳内では、電磁場の増強により、より高密度が期待される。

BEC は、多数の量子で構成される量子多体系がお互いの相関によってあたかも一つの存在であるかのように振る舞う現象である。脳内に広く分布している水の電気双極子場と光子場で構成される量子多体系の Bose-Einstein 凝縮体を統合された意識として取り扱うとするアイデアは興味深い。

6. デコヒーレンス問題について

脳機能を量子論で説明しようとする試みに対する最大の批判はデコヒーレンスに関するものである [53]。脳の系は、“too warm, too wet, too noisy” であり、量子的コヒーレンスは維持できないという批判である。

ただし、Tegmark によるこの文献に提案されている時間スケールは、分子に対する量子論の時間スケールに比べて極めて小さい点に疑義がある。例えば、水分子のコヒーレンスに関する点では、水分子そのものの質量 ($18 \times 940 \text{ MeV}$) を時間スケールの評価に使っており、見積られるデコヒーレンス時間は、 $\tau_{dec} \sim 10^{-20} \text{ s}$ と主張されている。しかしながら、本来、水分子の回転自由度の場合あるいは電気双極子場のコヒーレンスを扱う場合には、慣性モーメント I の逆数である $1/I = 4 \text{ meV}$ や電気双極子場と光子場の連成場であるボラリトンの質量を使うべきである。とこ

ろが、文献 [53] では、これらのエネルギースケールに関する考察を欠いている。通常、分子レベルの衝突緩和の典型的な時間スケールはピコ秒程度 [54] であり、Tegmark の評価ではこのようなスケールをさらに「関与する Na イオンの数 10^6 で割る」といった奇妙な論理も展開されている。ただし、ピコ秒程度でも脳の量子コヒーレンスにとって短い時間スケールであるため、これをさらに長くする機構（例えば上記の BEC など）が必要である。

さらに、脳は常にエネルギーと物質の供給され続ける開放系であることも考慮すべきである。例えば、Fröhlich の模型は、エネルギー供給源、物理系そして熱浴の 3 つの系で構成されており、エネルギー供給を伴っている。脳の量子物理系を考える際には、上記の 3 つの系を用意して議論する必要があると考えられる [55, 56]。その際、エネルギー供給を行い続けた場合のデコヒーレンスとエラー訂正のバランスを議論する必要がある。

また、常温でも維持される対称性の破れた巨視的真空あるいは秩序の例としては、連続的空間並進対称性の破れた結晶あるいは磁気双極子の回転対称性の破れた強磁性体などといった例を上げることができる。結晶はフォノンと呼ばれる Nambu-Goldstone (NG) 粒子によって維持される。強磁性体はマグノンと呼ばれる NG 粒子によって秩序が維持されている。Del Giudice らは、水分子の巨視的真空の例として実験的に実現している Exclusion Zone (EZ) water [57] を挙げており、EZ water の実験の特徴は、水分子のコヒーレント状態のそれと対応していると主張している [58]。さらに、近年発展している量子生物学の分野では、光合成、嗅覚、磁気受容などのメカニズムにおいて量子性が重要な役割を果たすことが示唆されている [59, 60]。また、Kerskens らは、脳内で量子もつれ現象が生じている可能性のあることを MRI 実験により示している [61]。実験における新展開を鑑みると、生理学的温度での量子コヒーレンスを安易に排除してしまうのは、早計なのではないだろうか。臨界温度以下での BEC 安定化、開放系における物質・エネルギー供給によるエラー（デコヒーレンス）訂正、開放かつ非平衡システムにおける自己組織化、エネルギー的に安定な常温での巨視的秩序などを理論・実験両面から示すことがデコヒーレンス問題を解決する上での今後の課題である。

7. 脳科学の難問への応用

この節では、脳科学の難問に対し、量子場脳理論を採用した場合の見通しについて述べる。本稿では、主に記憶機構の仮説である量子場脳理論について述べた。記憶機構に対し、量子場脳理論-ホログラフィそして散逸量子模型といったアプローチを紹介した。量子場脳理論では、記憶機構の問題だけでなく、結びつけ問題、麻酔機構、脳波の起源、そして意識のハードプロブレムに対してこれまでにないアプローチが与えられる。

まず、いかにして脳は各部位で分散処理されている情報を統合し単一の心として機能するのかという「結びつけ問題 (binding problem)」がある。量子場脳理論は、脳内の情報処理および統合のメカニズムとして、いくつかの情報伝達手段を与えてくれる。第一に、情報伝達手段として挙げられるのは、電磁場に関するものである。電磁場は、各点の電荷-電流分布によって生成されるとともに、逆に電荷-電流分布に影響を与える。McFadden は、統合されたまたは単一の主観的経験-意識として「意識的電磁場」の関与について言及している [62-64]。ニューロンの電気作用は、電磁場を発生させ、逆に発生した電磁場が、無線通信のように脳内を駆け巡り、脳内の他のニューロンの発火パターンを変化させる。近年、細胞外電場によるワイアレス情報通信が再注目されている [65,66]。第二に、情報伝達手段として超放射が挙げられる。量子場脳理論では微小管内部の水の電気双極子が、励起状態にある状態から短い時間スケールで一斉に基底状態へと緩和し、一瞬の閃光として超放射光が放射される解を導き出すことができる [33,36]。微小管内部の水の電気双極子場と電磁場の非線形相互作用によって、微小管内を熱的緩和の影響を受けることなく伝搬するソリトン解を導出することができる。この量子電磁力学的現象は、自己透明化現象と呼ばれる。超放射光を記憶が保持されているホログラムに照射すると記憶の想起を行うことができる。超放射光ネットワークは、記憶の想起を伴う情報伝達および統合に重要な役割を果たすことが期待される。さらに、第三の情報伝達手段としてエヴァネッセント光子のトンネル効果を挙げることができる [38,56,67]。水分子の電気双極子の向きが揃ったコヒーレント領域が2つあり、非コヒーレント領域によって隔てられている状態を考える。非コヒーレント領域の厚みが十分小さい場合に、2つのコヒーレン

ト領域間で光子の量子トンネル効果が起こることが期待される。超伝導の分野では、Josephson 効果と呼ばれる現象である。2つのコヒーレント領域間で、たとえ電位差が無くとも位相差が存在する場合には、直流 Josephson 効果として電荷の移動が起きる。また、電位差があれば交流の電流が流れる (交流 Josephson 効果)。トンネル効果により、コヒーレント領域間の情報通信ネットワークが実現されることが期待される。

次に、麻酔の問題について述べる。麻酔の機序については、未だに解明されていない。麻酔については、Meyer-Overton (MO) の法則が有名である。この法則によれば、最小肺胞内濃度の逆数とオリーブオイル (油) のような無極性の溶媒への溶解性との間に高い相関が認められる [68,69]。当初、この相関から麻酔薬は、細胞の脂質二重層の興奮性へ重要な影響を与えると捉えられた。しかし、MO の法則には、問題がある。例えば、麻酔効果の立体異性体 (キラル) 間の違いを説明できない。さらには、アルコール基あるいはアルカン基の長さを増やしていくと麻酔効果がなくなること (カットオフ現象と呼ばれる) を説明できない。また、MO の法則には例外がある。1,3,5 tris(trifluoromethyl)benzene (TFMB) や 1,2 dichlorohexafluorocyclobutane (F6) などである。これらは、油への溶解性から麻酔効果が期待されたが、十分高い濃度でも麻酔効果を示さないことが知られている。また、flurothyl は、MO の法則からは麻酔効果がないと予想されるが、実際には麻酔薬としての効果が認められる。近年、麻酔機序については、イオンチャネル (膜タンパク受容体) への作用を考えるのが主流である [70]。こういった状況の中、別の可能性も言及されている。本稿では、量子場脳理論に関連する可能性のある2つの説を挙げることにする。

一つ目は、細胞内の微小管に関するものである。1968年、Allison と Nunn [71] は、麻酔剤 halothane が微小管の脱重合 (depolymerization) を引き起こすことを報告した。ただし、これは最小肺胞内濃度の5倍の濃度でのことである。さらに、Echenhoff らのグループは、放射性標識 halothane を投与した場合に70個の異なる神経タンパク質に結合することを報告した [72]。この結合部位の中に、微小管のチューブリンが含まれている。Craddock らは、微小管に着目し、麻酔薬のチューブリンへの影響を数値計算を用いて調査した [73]。彼らは、麻酔効果を持つ複数の薬剤 (flurothyl を含む) が結合した場合のチューブリンに

おける電気双極子の集団振動モードを調べた。その結果、振動数 613 ± 8 THz に対し、振動数のシフト（減少）が認められた。さらに興味深いことに、麻酔効果のない TFMB および F6 は、この振動数周辺の減少は認められず、むしろ増加が見られた。彼らは、振動モードの変化は、微小管の重合や機能に影響を与えると考察している。また、613 THz は、光の波長としては可視光 489 nm に対応することから、チューブリンのコヒーレントな電氣的振る舞いに変化することが推測される。理論的には、2つの分子が同じ振動数で電子的共鳴状態にある時、距離 r に対し分子同士は r^{-3} の長距離相互作用を示すが、非共鳴状態の時には、van der Waal 相互作用のように r^{-6} の依存性となる。麻酔薬は、相互作用の長距離依存性を r^{-3} から r^{-6} へと変化させることで長距離の連携を妨げる可能性がある。Craddock らは、麻酔薬は、学習、記憶、認知および長期増強において細胞骨格の秩序に影響を与えるとともに、集団的な神経活動を妨げると主張している。

二つ目の説は、細胞内の表面水についてである [74]。(Pauling は、水に関する様々な研究を行っており、麻酔と水分子との関連を指摘している [75, 76]。ただし、Pauling のアイデアは、直接的な証拠を与えていない。) 細胞内には、細胞骨格をはじめとした様々な親水基が存在していることから、細胞内の水は、主に親水基の周りの表面水と考えられ電解質を排除する“Exclusion Zone (EZ)”を形成すると考えられている。(これが、バケツに入れた只の水と細胞内の水との違いである。) Kundacina らは、この EZ 水が麻酔薬により、どのような影響を受けるのかを実験的に調べた。彼らは、親水性を示す nafion ポリマーと水からなる系を用意し、EZ のサイズが麻酔薬によってどのように変化するのか報告した。麻酔薬 (lidocaine, bupivacaine および isoflurane) を少量投与した時には、EZ は増大することが認められた。さらに投与量を増やしていくと EZ は減少に転じた。さらに、麻酔薬の濃度を段階的に低下させていくと、再び投与前の EZ が回復されることが認められた。少量投与した時が、麻酔の Stage II の興奮期に対応し、投与量を増やした時が、Stage III の手術期および Stage IV の呼吸麻痺期に対応していると考えられる。また、EZ 水は、負の電荷を持つことが知られている。このことから、細胞内の負電荷や負電位の一部は EZ 水によるものだと考えられる。負の電位は活動電位を生み出し、細胞間の通信に重要な働きを行う。もし、麻酔薬に

よって、EZ 水の減少によって細胞内電位が小さくなれば、細胞は、適切に機能することができなくなる。さらに、麻酔薬が EZ 水に作用しているという説は、圧力を上げた時に昏睡状態から回復する機序も説明するかもしれない。もし、EZ のサイズが小さくなることで昏睡状態が引き起こされるのであれば、気圧を上昇させたときに EZ のサイズが増大することが必要である。Ypma と Pollack [77] の実験では、気圧を増大させた時に EZ のサイズが有意に増大することが報告されている。量子場脳理論が言及しているコヒーレント水が EZ 水に対応している場合、水の電気双極子-光子理論が麻酔機構の解明に貢献するかもしれない。

次に、脳波の起源について散逸量子模型の見解を述べる。Freeman と Vitiello は、観測される脳波の振幅変調のパターンとスクイーズドコヒーレント状態との関連に言及している [78, 79]。水分子の回転対称性の破れに伴い、電気双極子の向きが揃った巨視的真空が実現される。対称性の破れに伴い、質量を持たない Nambu-Goldstone 粒子 (dipole wave quanta: DWQ) が発生する。このとき、脳を開放系と捉えることで、DWQ の自由度が2倍になり、2モードスクイーズドコヒーレント状態を生成することができる。エネルギー期待値がゼロとなるスクイーズドコヒーレント状態の数は、4.1 節で指摘したように、モードごとの粒子数 $\mathcal{N}_{A_{\kappa}} = \mathcal{N}_{\bar{A}_{\kappa}}$ を満たす条件であれば、無限に生成することができる。Freeman らは、脳波の振幅変調のパターンが、散逸量子模型におけるスクイーズドコヒーレント状態における $\mathcal{N}_{A_{\kappa}}$ に対応していると主張している。

最後に、意識のハードプロブレムについて述べる。Chalmers は、意識の問題についての「イージー」プロブレムと「ハード」プロブレムを分けて考える必要があると論じている [80]。彼によれば、意識の物理相関を扱う記憶、麻酔、脳波、結びつけ問題などは、「イージー」プロブレムに分類される。それに対し、我々の主観的体験 (クオリア) および自由意志は、「ハード」プロブレムである。クオリアの問題とは、物質である我々の脳になぜ、そしてどのように主観的な体験が生まれるのかという問題である。夕日の赤を見た時の赤らしさ、熱湯に触れた時の熱い感覚、などの五感感覚は、なぜ生じるのだろうか？ また、意識については自由意志の問題も重要である。地球上で物体を投げると、空気抵抗を受けながら放物線を描く軌道を通る。軌道はニュートン力学に基づいて決定論に従うのが、

古典論の帰結である。脳も決定論的な古典力学に従うならば、自由意志など入り込む余地はない。我々は、自らの力では変えることのできない外の世界をただ体験しているだけののだろうか？もし、世界が古典力学のみで記述できるならばその通りである。しかし、世界は古典論だけでなく量子論により記述される。2重スリットに光子を入射させていくと、2つのスリットを同時に通過することにより、その先の壁に干涉縞を作る。光子を100万回入射させた時に、どのあたりに光子が来るのかという傾向は分かるが、光子を1つ入射させた時に、次にどこで観測されるのかは、予測不可能である。Kauffmanらは、意識とは、量子的重ね合わせにある状態（可能性の世界）を一つの観測結果に収縮させる媒介となっていると主張している [81]。著者らは、量子場脳理論の枠組みで記述されるホログラムを脳外の電磁場を用いて操作することでクオリアを操ることを提案している [50]。外部から主観的体験を操作することで、ホログラムとクオリアの対応関係が認められるかもしれない。意識の問題に対しては、物質主義、Descartes の心身二元論、唯心論 [82]、Spinoza の二重側面理論などの考えがある。意識の問題を量子論と組み合わせるといことは、意識の存在を量子へと結びつける還元主義に対応するのだろうか？あるいは、素粒子一つ一つに意識が存在するという汎心論へと帰結することになるのだろうか？記憶はクオリアを伴っている。従って、記憶を外部から書き換えることはクオリアを操ることに相当する。脳の言語がホログラフィであれば、物質的なホログラムを操作することは記憶、そしてクオリアを操作することに相当する。著者らは、まず記憶・意識を量子場へと要素還元するという意味で還元主義の立場を取る。量子場脳理論の今後の展開が期待される。

8. まとめ

本稿では、Umezawa らによる場の量子論の提案に始まり、Jibu らによって展開された量子場脳理論の歴史を振り返った。そこでは、記憶が水の電気双極子の向きが揃った巨視的真空によって与えられることが主張されている。さらに近年の散逸量子模型やホログラフィ理論のシナリオについて言及した。また、エヴァネッセント光子の Bose-Einstein 凝縮体としての単一の意識について言及した。加えて、デコヒーレンスに関する批判に対して、著者らの見解を述べた。さら

に、脳科学の難問を解こうとするいくつかの試みを提示した。

「量子脳理論」は客観科学として、完全に捨て去るべき「妄想」ではない。脳機能を記述しうるモデルシステムとして、引き続き批判的検討の俎上に乗せるべき対象であり、「脳や意識をどう記述するか」という深遠な問題を解く鍵を与える可能性がある。量子場脳理論は怪しげな擬似科学ではない。脳の物質的実体として水と電磁場に注目し、その生理的条件下での非平衡ダイナミクスを場の量子論によって記述し、脳科学における難題である記憶や意識のメカニズム解明の問題と対比させて論じる。近年、量子認知や量子意思決定に関わる研究は世界的な盛り上がりを見せており、そのマイクロモデルとしても理論・実験両面から更なる検討が必要と思われる、国内外の研究者の本分野への参入を期待している。毎年開催される Consciousness 国際会議においても、量子脳理論は重要なトピックスの一つとして扱われている。

参考文献

- [1] Jeff Hawkins and Sandra Blakeslee. *On intelligence*. Macmillan, 2004.
- [2] Karl Spencer Lashley. *Brain mechanisms and intelligence: A quantitative study of injuries to the brain*. University of Chicago Press, 1929.
- [3] F Bartlett and ER John. Equipotentiality quantified: The anatomical distribution of the engram. *Science*, 181(4101):764-767, 1973.
- [4] Walter J Freeman et al. *Mass action in the nervous system*, volume 2004. Citeseer, 1975.
- [5] Karl H. Pribram. *Languages of the brain: Experimental paradoxes and principles in neuropsychology*. Prentice-Hall, 1971.
- [6] Karl H Pribram, Kunio Yasue, and Mari Jibu. *Brain and perception: Holonomy and structure in figural processing*. Psychology Press, 1991.
- [7] Dennis Gabor. A new microscopic principle. *Nature*, 161:777-778, 1948.
- [8] Mari Jibu and Kunio Yasue. *Quantum brain dynamics and consciousness*. John Benjamins, 1995.
- [9] 保江邦夫, 高橋 康『量子場脳理論入門；脳・生命科学のための場の量子論』, サイエンス社, 東京, 2003, vi+ 196p., (臨時別冊・数理科学 sgc ライブラリー 25).
- [10] Donald W Pfaff, Nora D Volkow, and John L

- Rubenstein. *Neuroscience in the 21st century: from basic to clinical*. Springer Nature, 2022.
- [11] Romain P Boisseau, David Vogel, and Audrey Dussutour. Habituation in non-neural organisms: evidence from slime moulds. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 283(1829):20160446, 2016.
- [12] Masayuki Murata and Kenji Leibnitz. *Fluctuation-Induced Network Control and Learning: Applying the Yuragi Principle of Brain and Biological Systems*. Springer, 2021.
- [13] Roger Penrose. *The emperor's new mind: Concerning computers, minds, and the laws of physics*. Oxford University Press, 1989.
- [14] Stuart Hameroff. Quantum computation in brain microtubules? the Penrose–Hameroff ‘orch’ or ‘model of consciousness’. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1743):1869–1896, 1998.
- [15] Travis J. A. Craddock, Jack A. Tuszyński, and Stuart Hameroff. Cytoskeletal signaling: Is memory encoded in microtubule lattices by camkii phosphorylation? *PLOS Computational Biology*, 8(3):1–16, 03 2012.
- [16] Hiroomi Umezawa. *Advanced field theory: Micro, macro, and thermal physics*. AIP, 1993.
- [17] Luigi Maria Ricciardi and Horoomi Umezawa. Brain and physics of many-body problems. *Kybernetik*, 4(2):44–48, 1967.
- [18] C.I.J.M. Stuart, Y. Takahashi, and H. Umezawa. On the stability and non-local properties of memory. *Journal of Theoretical Biology*, 71(4):605–618, 1978.
- [19] C.I.J.M. Stuart, Y. Takahashi, and H. Umezawa. Mixed-system brain dynamics: neural memory as a macroscopic ordered state. *Foundations of Physics*, 9(3-4):301–327, 1979.
- [20] Herbert Fröhlich. Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes. *Physics Letters A*, 26(9):402–403, 1968.
- [21] Herbert Fröhlich. Long-range coherence and energy storage in biological systems. *International Journal of Quantum Chemistry*, 2(5):641–649, 1968.
- [22] A.S. Davydov and N.I. Kislukha. Solitons in one-dimensional molecular chains. *physica status solidi (b)*, 75(2):735–742, 1976.
- [23] J.A. Tuszyński, R. Paul, R. Chatterjee, and S.R. Sreenivasan. Relationship between Fröhlich and Davydov models of biological order. *Physical Review A*, 30(5):2666, 1984.
- [24] E. Del Giudice, S. Doglia, M. Milani, and G. Vitiello. Spontaneous symmetry breakdown and boson condensation in biology. *Physics Letters A*, 95(9):508–510, 1983.
- [25] E. Del Giudice, S. Doglia, M. Milani, and G. Vitiello. A quantum field theoretical approach to the collective behaviour of biological systems. *Nuclear Physics B*, 251:375–400, 1985.
- [26] Emilio Del Giudice, Giuliano Preparata, and Giuseppe Vitiello. Water as a free electric dipole laser. *Physical Review Letters*, 61(9):1085, 1988.
- [27] E. Del Giudice, C.W. Smith, and G. Vitiello. Magnetic flux quantization and Josephson systems. *Physica Scripta*, 40:786–791, 1989.
- [28] I.N. Marshall. Consciousness and Bose-Einstein condensates. *New Ideas in Psychology*, 7(1):73–83, 1989.
- [29] M. Jibu and K. Yasue. A physical picture of Umezawa’s quantum brain dynamics. *Cybernetics and Systems Research*, 92:797–804, 1992.
- [30] Mari Jibu and Kunio Yasue. Intracellular quantum signal transfer in Umezawa’s quantum brain dynamics. *Cybernetics and Systems*, 24(1):1–7, 1993.
- [31] Giuliano Preparata. *QED Coherence in matter*. World Scientific, 1995.
- [32] Charles P. Enz. On preparata’s theory of a super-radiant phase transition. *Helvetica Physica Acta*, 70(1-2):141–153, 1997.
- [33] Mari Jibu, Scott Hagan, Stuart R. Hameroff, Karl H. Pribram, and Kunio Yasue. Quantum optical coherence in cytoskeletal microtubules: implications for brain function. *Biosystems*, 32(3):195–209, 1994.
- [34] Robert H. Dicke. Coherence in spontaneous radiation processes. *Physical Review*, 93(1):99, 1954.
- [35] Michel Gross and Serge Haroche. Superradiance: An essay on the theory of collective spontaneous emission. *Physics Reports*, 93(5):301–396, 1982.
- [36] Akihiro Nishiyama, Shigenori Tanaka, and Jack A. Tuszyński. Non-equilibrium quantum brain dynamics ii: Formulation in 3+1 dimensions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 567:125706, 2021.
- [37] Akihiro Nishiyama, Shigenori Tanaka, and

- Jack Adam Tuszynski. Quantum brain dynamics and holography. *Dynamics*, 2(2):187–218, 2022.
- [38] Mari Jibu and Kunio Yasue. What is mind?- quantum field theory of evanescent photons in brain as quantum theory of consciousness. *Informatica*, 21(3):471–490, 1997.
- [39] Giuseppe Vitiello. Dissipation and memory capacity in the quantum brain model. *International Journal of Modern Physics B*, 9(08):973–989, 1995.
- [40] Shantena A. Sabbadini and Giuseppe Vitiello. Entanglement and phase-mediated correlations in quantum field theory. application to brain-mind states. *Applied Sciences*, 9(15):3203, 2019.
- [41] Hiroomi Umezawa, Hiroshi Matsumoto, and Masashi Tachiki. Thermo field dynamics and condensed states. North-Holland, 1982.
- [42] Giuseppe Vitiello. Fractals, coherent states and self-similarity induced noncommutative geometry. *Physics Letters A*, 376(37):2527–2532, 2012.
- [43] Giuseppe Vitiello. Fractals as macroscopic manifestation of squeezed coherent states and brain dynamics. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 380, page 012021. IOP Publishing, 2012.
- [44] Jerome R Busemeyer, Zheng Wang, and James T Townsend. Quantum dynamics of human decision-making. *Journal of Mathematical Psychology*, 50(3):220–241, 2006.
- [45] Emmanuel M Pothos and Jerome R Busemeyer. A quantum probability explanation for violations of ‘rational’ decision theory. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1665):2171–2178, 2009.
- [46] Peter D Kvam, Timothy J Pleskac, Shuli Yu, and Jerome R Busemeyer. Interference effects of choice on confidence: Quantum characteristics of evidence accumulation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(34):10645–10650, 2015.
- [47] Masanari Asano, Irina Basieva, Andrei Khrennikov, Masanori Ohya, and Yoshiharu Tanaka. Quantum-like generalization of the bayesian updating scheme for objective and subjective mental uncertainties. *Journal of Mathematical Psychology*, 56(3):166–175, 2012.
- [48] Peter D Bruza, Zheng Wang, and Jerome R Busemeyer. Quantum cognition: a new theoretical approach to psychology. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(7):383–393, 2015.
- [49] Shigenori Tanaka, Toshihito Umegaki, Akihiro Nishiyama, and Hirotaka Kitoh-Nishioka. Dynamical free energy based model for quantum decision making. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 605:127979, 2022.
- [50] Akihiro Nishiyama, Shigenori Tanaka, and Jack A Tuszynski. Non-equilibrium ϕ^4 theory in a hierarchy: Towards manipulating holograms in quantum brain dynamics. *Dynamics*, 3(1):1–17, 2023.
- [51] Mari Jibu, Karl H Pribram, and Kunio Yasue. From conscious experience to memory storage and retrieval: The role of quantum brain dynamics and boson condensation of evanescent photons. *International Journal of Modern Physics B*, 10(13n14):1735–1754, 1996.
- [52] Gordon Baym, Jean-Paul Blaizot, Markus Holzmann, Franck Laloë, and Dominique Vautherin. The transition temperature of the dilute interacting Bose gas. *Physical Review Letters*, 83:1703–1706, Aug 1999.
- [53] Max Tegmark. Importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, 61(4):4194, 2000.
- [54] Shigenori Tanaka and Kohei Shimamura. Temperature relaxation in binary hard-sphere mixture system: Molecular dynamics and kinetic theory study. *The Journal of Chemical Physics*, 153(3):034114, 2020.
- [55] Akihiro Nishiyama and Jack A Tuszynski. Non-equilibrium ϕ^4 theory in open systems as a toy model of quantum field theory of the brain. *Annals of Physics*, 398:214–237, 2018.
- [56] Akihiro Nishiyama, Shigenori Tanaka, and Jack A Tuszynski. Non-equilibrium quantum electrodynamics in open systems as a realizable representation of quantum field theory of the brain. *Entropy*, 22(1):43, 2020.
- [57] Jian-ming Zheng and Gerald H. Pollack. Long-range forces extending from polymer-gel surfaces. *Physical Review E*, 68(3):031408, 2003.
- [58] Emilio Del Giudice, Vladimir Voeikov, Alberto Tedeschi, and Giuseppe Vitiello. The origin and the special role of coherent water in living systems. *Fields of the Cell*, pages 95–111, 2014.
- [59] Neill Lambert, Yueh-Nan Chen, Yuan-Chung Cheng, Che-Ming Li, Guang-Yin Chen, and Franco Nori. Quantum biology. *Nature Physics*, 9(1):10–18, 2013.

- [60] 田中 成典. 量子と生命, 現代思想. 48(2):97–107, 2020.
- [61] Christian Matthias Kerskens and David López Pérez. Experimental indications of non-classical brain functions. *Journal of Physics Communications*, 6(10):105001, 2022.
- [62] John Joe McFadden. *Quantum evolution*. WW Norton & Company, 2002.
- [63] John Joe McFadden. The conscious electromagnetic information CEMI field theory: the hard problem made easy? *Journal of Consciousness Studies*, 9(8):45–60, 2002.
- [64] John Joe McFadden. The CEMI field theory closing the loop. *Journal of Consciousness Studies*, 20(1-2):153–168, 2013.
- [65] A. Arvanitaki. Effects evoked in an axon by the activity of a contiguous one. *Journal of Neurophysiology*, 5(2):89–108, 1942.
- [66] 毛内 弘. 脳を司る「脳」: 最新研究で見えてきた、驚くべき脳のはたらき. 講談社, 2020.
- [67] Akihiro Nishiyama and Jack A. Tuszynski. Non-equilibrium ϕ^4 theory for networks: towards memory formations with quantum brain dynamics. *Journal of Physics Communications*, 3(5):055020, 2019.
- [68] H Meyer. Welche eigenschaft der anaesthetica bedingt ihre narkotische wirkung? *Naunyn-Schmiedeberg's Arch Exp Pathol Pharmacol*, 42:109–118, 1899.
- [69] E Overton. *Studien über die Narkose zugleich ein Beitrag zur allgemeinen Pharmakologie*. 1901.
- [70] Shuya Nakata, Yoshiharu Mori, and Shigenori Tanaka. Anesthetic Binding Induced Motion of GABA_A Receptors Revealed by Coarse-Grained Molecular Dynamics Simulations. *The Journal of Physical Chemistry B*, 127:6306–6315, 2023.
- [71] AC Allison and JF Nunn. Effects of general anaesthetics on microtubules: a possible mechanism of anaesthesia. *The Lancet*, 292(7582):1326–1329, 1968.
- [72] Jonathan Z Pan, Jin Xi, John W Tobias, Maryellen F Eckenhoff, and Roderic G Eckenhoff. Halothane binding proteome in human brain cortex. *Journal of Proteome Research*, 6(2):582–592, 2007.
- [73] Travis JA Craddock, Philip Kurian, Jordane Preto, Kamlesh Sahu, Stuart R Hameroff, Mariusz Klobukowski, and Jack A Tuszynski. Anesthetic alterations of collective terahertz oscillations in tubulin correlate with clinical potency: Implications for anesthetic action and post-operative cognitive dysfunction. *Scientific Reports*, 7(1):1–12, 2017.
- [74] Nenad Kundacina, Minghui Shi, and Gerald H Pollack. Effect of local and general anesthetics on interfacial water. *PLoS One*, 11(4):e0152127, 2016.
- [75] Linus Pauling. A molecular theory of general anesthesia: Anesthesia is attributed to the formation in the brain of minute hydrate crystals of the clathrate type. *Science*, 134(3471):15–21, 1961.
- [76] 中田 力. 脳のなかの水分子: 意識が創られるとき. 紀伊國屋書店, 2006.
- [77] Rolf E Ypma and Gerald H Pollack. Effect of hyperbaric oxygen conditions on the ordering of interfacial water. *Undersea & Hyperbaric Medicine: Journal of the Undersea and Hyperbaric Medical Society, Inc*, 42(3):257–264, 2015.
- [78] Walter J Freeman and Giuseppe Vitiello. Nonlinear brain dynamics as macroscopic manifestation of underlying many-body field dynamics. *Physics of Life Reviews*, 3(2):93–118, 2006.
- [79] Walter J Freeman and Giuseppe Vitiello. Dissipation and spontaneous symmetry breaking in brain dynamics. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 41(30):304042, 2008.
- [80] David J Chalmers. *The conscious mind: In search of a fundamental theory*. Oxford Paperbacks, 1997.
- [81] Stuart A Kauffman and Dean Radin. Quantum aspects of the brain-mind relationship: A hypothesis with supporting evidence. *Biosystems*, 223:104820, 2023.
- [82] 中込照明. 唯心論物理学の誕生: モナド・量子力学・相対性理論の統一モデルと観測問題の解決. 海鳴社, 1998.

(2023 年 3 月 20 日投稿、2023 年 7 月 31 日再投稿、2023 年 7 月 31 日掲載決定)