

Квантовые механизмы раздражимости растений: гипотеза Боше–Пенроуза об Orch OR в микротрубочках как общебиологическом субстрате

Автор: Pavel Aleksandrov **ORCID:** 0009-0001-1921-2033 **Позиция автора:** Independent Researcher **Препринт:** <https://preprints.ru/article/2999> (2026-03-19) **DOI:** 10.24108/preprints-3114695

*«Не то, что мните вы, природа: Не слепок, не бездушный лик — В ней
есть душа, в ней есть свобода, В ней есть любовь, в ней есть язык» —
Ф.И. Тютчев, 1836*

Аннотация (русская)

Летучие анестетики — хлороформ, диэтиловый эфир, ксенон — обратимо подавляют раздражимость растений с тем же дозозависимым профилем, что и сознание животных. Этот феномен, детально задокументированный Джагадишем Чандрой Боше (1913–1926) и независимо воспроизведённый в рецензируемых журналах спустя 92 года [Yokawa et al., 2018], лишён механистического объяснения: у растений нет ни нейронов, ни синапсов — классических мишеней летучих анестетиков.

Настоящая работа предлагает объяснение — **гипотезу Боше–Пенроуза**: летучие анестетики подавляют раздражимость растений через тот же молекулярный механизм, что и сознание животных, — через связывание с гидрофобными карманами тубулина и нарушение квантовых суперпозиций конформационных состояний белка согласно теории оркестрованной объективной редукции (Orch OR; Пенроуз и Хаммероф, 1996). Гипотеза опирается на три независимые доказательные линии. Первая: механизм действия анестетиков специфичен к белковым гидрофобным карманам, а не к липидным мембранам — неиммобилайзеры, стереоизомеры и эксперименты с очищенной люциферазой однозначно указывают на белковую мишень [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Вторая: гидрофобные карманы тубулина эволюционно консервативны и структурно идентичны у растений и животных, что доказывается одинаковой эффективностью колхицина, таксола и нокадазола в обоих таксонах [Morejohn, 1991]. Третья: летучие анестетики изменяют коллективные ТГц-колебания тубулина пропорционально клинической мощности [Craddock et al., 2017], а стабилизатор микротрубочек эпотилон В задерживает потерю сознания у крыс [Pal et al., 2024].

Принципиально, что растительная клетка лишена ГАМК-А-рецепторов, NMDA-рецепторов, опиоидных рецепторов и иных нейронных мишеней анестетика — это делает тубулин фактически единственным молекулярным кандидатом и превращает растение в более чистую модельную систему для тестирования тубулинового механизма, чем нейронная ткань.

Дополнительно показано, что пять феноменов Боше образуют **иерархию четырёх уровней памяти** — от ультракратковременной интеграции стимулов (миллисекунды, суммация) через кратковременную память состояния (правило двух касаний Venus flytrap, ~30 с) и регуляторную память возбудимости (усталость, минуты–часы) до долговременной памяти (габитуация, 28 дней [Gagliano et al., 2014]). Правило двух касаний Venus flytrap формализуется как задача распределённого консенсуса без центрального узла — пространственная суммация без нейронной сомы. Субстрат каждого уровня памяти не установлен; спиновые состояния тубулина (CISS-эффект) рассматриваются как открытая гипотеза о едином носителе информации всей иерархии.

Гипотеза формулирует шесть проверяемых предсказаний, охватывающих молекулярный, биофизический, поведенческий и оптический уровни анализа, — каждое фальсифицируемо независимо. Если гипотеза верна, нейрон является не уникальным субстратом квантовых вычислений, а его эволюционной специализацией; граница сознания в природе — количественная, а не онтологическая.

Abstract (английский)

Volatile anesthetics reversibly suppress plant irritability — action potentials, habituation, and stimulus summation — with the same dose-dependent profile as in animal nervous tissue. This observation, documented by Jagadish Chandra Bose (1913–1926) and independently confirmed in peer-reviewed journals [Yokawa et al., 2018], lacks a mechanistic explanation: plants possess neither neurons nor synapses, the classical targets of anesthetic action.

We propose the **Bose–Penrose hypothesis**: volatile anesthetics suppress plant irritability through the same molecular mechanism as animal anesthesia — binding to hydrophobic pockets within tubulin, disrupting quantum superpositions of tubulin conformational states as proposed by Orchestrated Objective Reduction (Orch OR; Penrose & Hameroff, 1996). Three independent lines of evidence support this claim. First, plant tubulin shares ~75% sequence homology with animal tubulin, and hydrophobic pocket geometry is evolutionarily conserved, as demonstrated by identical efficacy of colchicine, taxol, and nocodazole

across plant and animal microtubules [Morejohn, 1991]. Second, the molecular mechanism of anesthetic action is specific to protein hydrophobic pockets, not lipid membranes: non-immobilizer compounds with high lipophilicity lack anesthetic activity; stereoisomers differ in potency; purified luciferase is inhibited by volatile anesthetics in the complete absence of membranes [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Third, volatile anesthetics alter collective THz oscillations of tubulin proportionally to clinical potency [Craddock et al., 2017], and the microtubule stabilizer epothilone B delays anesthetic-induced unconsciousness in rats [Pal et al., 2024].

Furthermore, Bose's five phenomena constitute a **four-level memory hierarchy** spanning milliseconds to weeks — temporal summation (ms), Venus flytrap two-touch rule (~30 s), fatigue (min–h), and habituation (28 days [Gagliano et al., 2014]) — implemented entirely without neurons. The Venus flytrap two-touch rule is analyzed as a distributed quorum-detection problem: spatial summation across physically separated trigger hairs without a central integrating node. These observations make plants a uniquely clean model for studying the physical substrate of biological memory, precisely because the absence of neurons eliminates competing mechanisms.

Critically, plant cells offer a methodological advantage unavailable in neurons: they lack GABA-A receptors, NMDA receptors, opioid receptors, and other classical neuronal anesthetic targets. Tubulin is thus virtually the exclusive molecular candidate for anesthetic action in plant cells — making plants a *cleaner* model system for testing the tubulin mechanism than neurons themselves.

The hypothesis implies that neurons are not the unique substrate of quantum computation, but an evolutionary specialization of a mechanism universal to all eukaryotes. We formulate six testable predictions spanning molecular, biophysical, behavioral, and optical levels of analysis: (1) affinity of volatile anesthetics for plant tubulin predicts potency of irritability suppression; (2) *Arabidopsis thaliana* CRISPR mutants with modified hydrophobic pockets show altered anesthetic sensitivity; (3) plant microtubules exhibit a scale-invariant resonance hierarchy analogous to that described for neural microtubules; (4) microtubule-disrupting agents impair habituation in *Mimosa pudica*; (5) terpenoid microtubule stabilizers enhance, rather than suppress, plant irritability; (6) volatile anesthetics alter birefringence of microtubule networks in living plant cells, detectable by polarization microscopy without fluorescent labeling. None of these experiments have been performed. Their results — in either direction — will advance understanding of the molecular basis of eukaryotic irritability and may reframe the question of where, in the continuous spectrum of living matter, quantum computation begins.

Ключевые слова

EN: Orch OR, plant irritability, microtubules, anesthetics, tubulin, quantum biology, Bose, Hameroff, Penrose, proto-consciousness, eukaryotic irritability, quantum coherence

RU: Orch OR, раздражимость растений, микротрубочки, анестетики, тубулин, квантовая биология, Боше, Хаммерофф, Пенроуз

1. Введение

Летучие анестетики — хлороформ, диэтиловый эфир, ксенон — обратимо подавляют раздражимость растений. Это наблюдение, детально задокументированное Джагадишем Чандрой Боше в серии работ 1913–1926 годов [Bose, 1913; 1926], остаётся без механистического объяснения по сей день. Парадокс состоит в следующем: традиционно мишени летучих анестетиков искали в нервной ткани — ионных каналах, синаптических рецепторах, нейронных мембранах. У растений нет ни нейронов, ни синапсов. Тем не менее хлороформ обратимо подавляет потенциалы действия, габитуацию и суммацию стимулов в растительных тканях — с тем же дозозависимым профилем, что и в нервной ткани животных [Bose, 1926]. После удаления анестетика все реакции восстанавливаются.

Ключ к этому парадоксу лежит в истории самой анестезиологии. В 1899–1901 годах Мейер и Овертон независимо установили, что сила летучего анестетика пропорциональна его жирорастворимости (коэффициенту распределения масло/вода) — и это соотношение выполняется через шесть порядков величины для химически несхожих молекул [Meyer, 1899; Overton, 1901]. На протяжении почти столетия эта корреляция объяснялась «разжижением» липидного бислоя клеточных мембран. Однако ряд экспериментов опроверг липидную теорию: неиммобилайзеры — молекулы с высокой жирорастворимостью, но лишённые анестетической активности [Koblin et al., 1994] — показали, что растворимости в мембране недостаточно. Стереоизомеры анестетиков различаются по активности несмотря на идентичную жирорастворимость — что указывает на хиральную, то есть белковую мишень. Решающим доказательством стала демонстрация Фрэнксом и Либом того, что летучие анестетики ингибируют очищенную люциферазу в отсутствие каких-либо мембран [Franks & Lieb, 1982; 1994]: мишенью является белок.

Квантовые эффекты в тёплой, влажной биологической среде более не являются теоретической экзотикой: они экспериментально подтверждены в фотосинтетических антенных комплексах [Fleming et al., 2007] и в магниторецепции птиц [Ritz et al., 2000]. Настоящая работа рассматривает иной механизм — квантовые суперпозиции в

гидрофобных карманах тубулина — с собственной независимой доказательной базой.

Хаммерофф предложил конкретный класс белковых мишеней: гидрофобные карманы внутри тубулина — основного структурного белка микротрубочек [Hameroff, 1998]. По теории оркестрованной объективной редукции (Orch OR), разработанной совместно с Пенроузом [Penrose & Hameroff, 1996; Hameroff & Penrose, 2014], именно в этих карманах реализуются квантовые суперпозиции конформационных состояний тубулина. Их коллапс в результате объективной редукции (OR) лежит в основе сознательного опыта. Летучие анестетики, связываясь с карманами через ван-дер-ваальсовы взаимодействия, подавляют квантовые суперпозиции и тем самым «выключают» сознание. Эта модель переинтерпретирует корреляцию Мейера–Овертона: она отражает не растворимость в мембранах, а аффинность к гидрофобным карманам белков, прежде всего тубулина. Прямым подтверждением служит работа Крэддока с соавторами [Craddock et al., 2017], показавшая, что летучие анестетики изменяют коллективные ТГц-колебания тубулина пропорционально их клинической мощности, и работа Пала с соавторами [Pal et al., 2024], в которой стабилизатор микротрубочек эпотилон В задерживал потерю сознания у крыс.

Микротрубочки не являются специфически нейронной структурой. Они присутствуют во всех эукариотических клетках и построены из того же α/β -тубулина. Растительный тубулин гомологичен животному приблизительно на 75% на уровне аминокислотной последовательности; геометрия гидрофобных карманов эволюционно консервативна, что подтверждается одинаковым действием колхицина, таксола и нокодазола на микротрубочки как растений, так и животных.

Из этого следует вопрос, которому посвящена настоящая статья: если летучие анестетики подавляют раздражимость растений через тот же молекулярный механизм — связывание с гидрофобными карманами тубулина, — что подавляется в растительных клетках? Если мишень та же, что у животных, логично предположить, что и подавляемый процесс тот же: квантовые вычисления в микротрубочках по механизму Orch OR.

Настоящая работа формулирует эту гипотезу — гипотезу Боше–Пенроуза — в строгой форме, прослеживает её доказательную цепочку от наблюдений Боше через корреляцию Мейера–Овертона к структурной биологии тубулина, и предлагает конкретные проверяемые предсказания. Если гипотеза верна, нейроны представляют собой не уникальный субстрат сознания, а его эволюционную специализацию: централизованную и многократно усиленную форму механизма, присущего всем эукариотическим клеткам.

2. Исторический контекст: работы Боше

Джагадиш Чандра Боше (1858–1937) — индийский физик и биофизик, один из пионеров исследования электрических сигналов в живых тканях. Работая в Калькутте в конце XIX — начале XX века, он последовательно демонстрировал, что реакции растений на внешние раздражители поддаются точному количественному измерению и обнаруживают черты, традиционно приписываемые исключительно нервной ткани животных. Для этого Боше сконструировал крескограф — прибор с механическим усилением до 10 000 крат, позволявший регистрировать микроскопические движения тканей, — а также электрический зонд для записи распространяющихся потенциалов [Bose, 1902; 1913].

В ходе систематических экспериментов Боше описал пять феноменов, каждый из которых в отдельности допускал объяснение с позиций классической физиологии, но в совокупности складывался в картину, выходящую за её рамки.

Потенциал действия. При механическом, термическом или химическом раздражении по тканям растения распространяется волна электрического потенциала. По форме кривой — нарастание, пик, реполяризация — она воспроизводит потенциал действия животной нервной ткани [Bose, 1913]. Скорость распространения у разных видов варьирует, однако принцип «всё или ничего» выполняется: подпороговый стимул не вызывает распространяющегося сигнала. Современная электрофизиология полностью подтвердила существование распространяющихся потенциалов у растений [Fromm & Lautner, 2007]; в 2021 году биоманнитные сигналы *Venus flytrap* были зарегистрированы атомным магнетометром — прибор зафиксировал магнитный аналог нейронного потенциала действия [Fabricant et al., 2021].

Габитуация. При повторных слабых раздражениях амплитуда ответа постепенно снижается и может упасть до нуля; после периода покоя чувствительность восстанавливается [Bose, 1926]. Этот феномен — простейшая форма обучения — считался прерогативой нервной системы. Гальяно с соавторами воспроизвели его у *Mimosa pudica* в строго контролируемом современном эксперименте: растения обучались игнорировать повторные безвредные падения и сохраняли выработанный ответ спустя 28 дней [Gagliano et al., 2014]. В том же цикле работ была продемонстрирована способность растений к ассоциативному обучению [Gagliano et al., 2016] — феномен, прежде связывавшийся исключительно с нервной системой.

Суммация. Два подпороговых стимула, разделённых коротким интервалом, способны вызвать надпороговый ответ [Bose, 1913] — явление, аналогичное

временной суммации в синапсах. Современные исследования Ca^{2+} -сигналикации показали, что растение обладает системой быстрых кальциевых волн, способных интегрировать множественные сигналы в пространстве и времени [Toyota et al., 2018] — биохимический субстрат, объясняющий наблюдавшуюся Боше суммацию без привлечения синаптических структур.

Усталость. После серии сильных раздражений растение перестаёт отвечать на стимул и восстанавливает реактивность лишь спустя период отдыха [Bose, 1926]. Боше интерпретировал это как истощение физиологического ресурса, аналогичное рефрактерному периоду нервного волокна. Однако эта интерпретация неполна. В нейроне усталость имеет известный молекулярный адрес: истощение запасов нейромедиатора, накопление Ca^{2+} внутри клетки, сдвиг ионных градиентов. У растения специализированного аппарата для «накопления усталости» нет — и тем не менее усталость есть. Значит, нечто меняет своё состояние под воздействием повторных стимулов и удерживает это изменение на протяжении периода восстановления. Молекулярный субстрат этого состояния не установлен. Существенно, что усталость у Боше — не пассивное истощение ресурса: это регуляторный феномен. Система не «ломается» от перегрузки, она входит в защищённое состояние пониженной возбудимости и затем активно возвращается к исходной норме. Иными словами, у неё есть уставка нормальной возбудимости и механизм возврата к ней — что выводит усталость за рамки простой физиологии и делает её психоподобным откликом в точном смысле: не просто реакцией, а саморегуляцией.

Обратимое подавление анестетиками. Это центральное наблюдение для настоящей работы. Боше показал, что хлороформ и другие летучие анестетики полностью и обратимо подавляют все перечисленные реакции [Bose, 1926]. После вымывания анестетика растение восстанавливает реактивность — иногда проходя через кратковременную фазу повышенной возбудимости, сходную с наблюдаемой у животных. Боше сопоставил эти данные с действием тех же веществ на нервную ткань и констатировал качественное совпадение. Спустя почти столетие это наблюдение было воспроизведено независимой группой: Йокава с соавторами показали, что диэтиловый эфир блокирует потенциалы действия Venus flytrap и подавляет движения разнообразных органов растений; после азрации все реакции восстанавливались в течение 15 минут [Yokawa et al., 2018]. Позднее тот же коллектив опубликовал систематический обзор, распространив этот вывод на всю сенсорную и адаптивную систему растений [Yokawa & Baluška, 2021]. Таким образом, ключевое наблюдение Боше подтверждено в рецензируемых журналах Oxford University Press и Springer независимыми методами спустя 92 года после его первоначальной публикации.

Пять описанных феноменов объединяет общая структурная сигнатура. Реакции растений на раздражители — адаптивны (ответ меняется в зависимости от истории воздействий), интегративны (несколько входных сигналов объединяются в единый выходной) и полностью обратимы (система восстанавливает исходное состояние после прекращения воздействия). Именно эта архитектура — а не конкретный биохимический субстрат — роднит реакции растений с реакциями нервной ткани животных. Для обозначения данного класса реакций мы предлагаем термин **психоподобные отклики** (*psycho-like responses*): адаптивные, интегративные и обратимые реакции на внешние воздействия, структурно гомологичные психофизиологическим процессам. Термин нейтрален относительно вопроса о сознании: он описывает *архитектуру* отклика, а не его внутреннюю природу, и применим независимо от того, сопровождается ли данный процесс субъективным переживанием.

При более пристальном рассмотрении пять психоподобных откликов распределяются по непрерывному спектру временных масштабов хранения информации. Суммация действует на масштабе долей секунды: след первого стимула должен сохраняться до прихода второго — ультракратковременная интеграция, аналог рабочей памяти. Промежуточный масштаб — секунды — задокументирован у Venus flytrap: ловушка захлопывается только при двух касаниях разных чувствительных волосков в течение ~30 секунд [Hedrich & Neher, 2018]; след первого касания должен присутствовать в ткани к моменту второго — это кратковременная память состояния. Усталость разворачивается на масштабе минут и часов: система удерживает состояние перегрузки до завершения восстановления. Габитуация действует на масштабе недель: растение помнит безопасность конкретного стимула спустя 28 дней без единого повторения [Gagliano et al., 2014] — долговременная память по любому функциональному критерию. Таким образом, пять феноменов Боше образуют **иерархию четырёх уровней памяти**: от долей секунды до месяца. Субстрат каждого уровня не установлен.

С позиций теории информационных систем эта иерархия приобретает неожиданную чёткость. Суммация — регистры процессора: существует лишь в момент вычисления. Venus flytrap — кэш L2/L3: десятки секунд, volatile. Усталость — оперативная память: удерживает состояние рабочего сеанса, сбрасывается при «перезагрузке». Габитуация — постоянная память: переживает 28 «циклов сна». Аналогия немедленно обнажает главный вопрос: **как функционирует этот биологический компьютер?** Что является носителем информации, где хранится программа и каков механизм её работы? В компьютере каждый уровень имеет известный субстрат — кремний, заряды, магнитные домены. В растении субстрат каждого уровня не установлен. Вероятно, это паттерны состояний, распределённые по тубулиновой сети — подобно тому, как файл закодирован в распределённом

паттерне физических состояний носителя, а не «лежит» в одном месте.

Правило двух касаний Venus flytrap ставит отдельный системный вопрос о **пространственной суммации**. Два сигнала приходят от физически разделённых волосков — места интеграции нет. Чтобы порог был достигнут коллективно, каждая клетка ткани должна удерживать след первого касания до прихода второго. В терминах распределённых систем: это консенсус без master-узла, quorum detection без координатора. Примечательно, что правило двух касаний является ещё и фильтром: капля дождя (хаотичный одиночный стимул) ловушку не захлопнет. Система не просто суммирует — она классифицирует сигнал по паттерну. Это когнитивная функция, реализованная в ткани без единого нейрона.

Одним из кандидатов на роль субстрата памяти могут служить спиновые состояния самого тубулина. Тубулин — хиральный белок, и его спиральная структура должна проявлять CISS-эффект (Chiral Induced Spin Selectivity) — избирательное пропускание электронов по спиновой ориентации, подтверждённое для ДНК и белков [Naaman & Waldeck, 2012]. Триптофановые остатки гидрофобного кармана — те самые, с которыми связывается анестетик, — формируют ароматические радикальные пары со спин-зависимой рекомбинацией. Комбинаторное пространство спиновых состояний тубулиновой сети астрономически велико — достаточно для кодирования любого объёма биологической информации без дополнительных молекулярных структур. Это открытая гипотеза, не имеющая прямой экспериментальной проверки на растительном тубулине; она рассматривается подробнее в отдельной публикации.

Когнитивная архитектура растений — иерархия четырёх уровней памяти, пространственная интеграция без центрального узла и вопрос о субстрате информации — выходит за рамки настоящей работы и составляет предмет отдельной теоретической публикации [Александров, в подготовке: «Иерархия когнитивных функций у растений»].

Значимость экспериментальной программы Боше не ограничивается растительным царством. В монографии 1902 года «Response in the Living and Non-Living» Боше задокументировал аналогичные явления в неорганической материи: металлы — олово, железо, никель — при повторной электрической стимуляции обнаруживали усталость (снижение амплитуды ответа), восстановление после периода покоя и — наиболее поразительно — подавление хлороформом, тем же агентом, который подавлял реакции растений [Bose, 1902]. Боше сформулировал явный вывод: граница между живым и неживым градуальна, а не онтологична; психоподобные отклики как архитектурный паттерн не принадлежат исключительно живой материи. Этот вывод, радикальный в 1902 году, приобретает новое измерение в контексте

настоящей гипотезы: если субстратом раздражимости растений являются квантовые процессы в тубулине, то аналогичные отклики металлов указывают либо на иной субстрат той же архитектуры, либо на более широкое распределение квантовых процессов в материи — вопрос, остающийся открытым.

Совокупность этих данных ставит один вопрос с нарастающей остротой: какой общий молекулярный субстрат обеспечивает феноменологию, наблюдаемую Боше и подтверждённую современной наукой? Ответ на него и составляет предмет настоящей работы.

3. Теория Orch OR и роль анестетиков

Микротрубочка — полый цилиндр диаметром ~25 нм, стенки которого образованы спирально упакованными димерами α/β -тубулина. Каждый димер состоит из двух субъединиц (~55 кДа каждая), связанных нековалентно. Внутри каждой субъединицы находятся гидрофобные карманы — полости, выстланные неполярными аминокислотными остатками (лейцин, изолейцин, фенилаланин, триптофан) и изолированные от водного окружения. Низкий диэлектрик внутри кармана и минимальный тепловой шум от воды создают условия, принципиально отличающиеся от цитоплазматической среды [Hameroff, 1998].

Теория оркестрованной объективной редукции (Orch OR), разработанная Пенроузом и Хаммерофом [Penrose & Hameroff, 1996; Hameroff & Penrose, 2014], предполагает, что конформационные состояния тубулинового димера — две возможные пространственные конфигурации β -субъединицы — могут существовать в квантовой суперпозиции. Каждый димер таким образом функционирует как кубит, а вся микротрубочка, содержащая тысячи димеров в суперпозиции, реализует массивно параллельное квантовое вычисление.

Коллапс суперпозиции в теории Orch OR происходит не в результате декогеренции от теплового окружения (как в стандартной квантовой механике открытых систем), а вследствие объективной редукции (OR) — физического процесса, обусловленного нестабильностью суперпозиции квантово-гравитационных различий в пространстве-времени. Критерий OR задаётся соотношением Дирака–Пенроуза: суперпозиция коллапсирует, когда её гравитационная самоэнергия E достигает порога $E\tau \approx \hbar$, где τ — время жизни суперпозиции, $\hbar$ — приведённая постоянная Планка [Penrose, 1994]. Именно в этом отличие Orch OR от чисто вычислительных моделей сознания: коллапс не случаен (как в стандартном квантовом измерении) и не алгоритмичен — он определяется геометрией пространства-времени, что и обеспечивает, по Пенроузу, невычислимый характер сознательного опыта.

Роль летучих анестетиков в этой схеме специфична и хорошо определена. Анестетики — вещества с высокой аффинностью к гидрофобным средам — проникают в карманы тубулина и связываются там через ван-дер-ваальсовы взаимодействия. Эти взаимодействия достаточно слабы, чтобы не изменять первичную структуру белка, но достаточно сильны, чтобы нарушить тонкую квантовую динамику внутри кармана: электронные конфигурации ароматических остатков (прежде всего триптофана), обеспечивающие квантовую когерентность, подавляются присутствием чужеродной молекулы [Hameroff, 1998]. Результат — невозможность устойчивой суперпозиции, OR не достигает порога, квантовое вычисление прерывается. По Orch OR, это и есть потеря сознания.

Квантовые эффекты в изолированных π -системах — не умозрительное допущение: они прямо измерены в структурно родственных молекулах. Фуллерен C_{60} и углеродные нанотрубки — системы с замкнутой или протяжённой π -электронной оболочкой и полным отсутствием полярных групп — демонстрируют квантовую интерференцию в условиях, при которых большинство органических молекул декогерируют мгновенно [Arndt et al., 1999]. Причина та же, что обеспечивает устойчивость суперпозиции в гидрофобном кармане тубулина: изоляция π -электронной системы от флуктуирующего дипольного окружения воды. Гидрофобный карман тубулина воспроизводит этот принцип биологическими средствами: неполярная полость с ароматическими остатками (Trp, Phe, Tyr) структурно аналогична фуллереновой клетке, а сама микротрубочка — полый цилиндр диаметром ~ 25 нм — геометрически сопоставима с многостенной нанотрубкой. Это не случайное сходство: похоже, оба класса структур независимо реализуют оптимальную геометрию для удержания квантовой когерентности в условиях теплового шума.

Эта модель получила прямое экспериментальное подтверждение. Крэддок с соавторами [Craddock et al., 2017] показали, что летучие анестетики изменяют коллективные ТГц-колебания тубулина, причём сила эффекта линейно коррелирует с клинической мощностью анестетика — воспроизводя корреляцию Мейера–Овертона, но уже на уровне белка, а не мембраны. Пал с соавторами [Pal et al., 2024] продемонстрировали, что введение эпотилона В — стабилизатора микротрубочек — задерживает потерю сознания у крыс под действием изофлурана: чем устойчивее микротрубочки, тем труднее анестетику прервать квантовое вычисление.

Особого внимания заслуживает резонансная иерархия, описанная Бандьопадхьяем с соавторами на основе широкополосных диэлектрических измерений микротрубочек [Sahu et al., 2013a; 2013b]. Авторы обнаружили масштабно-инвариантный ряд резонансных частот, охватывающий несколько порядков: ТГц (тубулиновый димер)

→ ГГц (олигомер) → МГц–кГц (микротрубочка) → Гц (пучок микротрубочек). Эта иерархия соответствует модели Orch OR, в которой квантовые суперпозиции отдельных димеров «оркестрируются» через когерентные колебания всей структуры. Показательно, что анестетики подавляют колебания именно в этом диапазоне — что согласуется с данными Крэддока и механизмом Хаммерофа.

Совокупность изложенного формирует связную молекулярную цепочку: гидрофобный карман тубулина → квантовая суперпозиция конформационных состояний → OR-коллапс → сознательный опыт; летучий анестетик → подавление суперпозиции в кармане → отсутствие OR → потеря сознания. В следующем разделе мы рассмотрим, в какой мере этот механизм переносим на растительные клетки.

Здесь необходимо сделать одну существенную оговорку. Термин «оркестрованная» указывает на нерешённую проблему самой теории: какой механизм согласует квантовые суперпозиции в тысячах тубулиновых димеров в биологически осмысленный результат? С позиций теории управления, любой контур координации предполагает целевое состояние (setpoint) — эталон, с которым сравнивается текущее состояние системы. Без setpoint координация невозможна: система не знает, к чему стремиться. Примечательно, что та же проблема возникает в отношении кинезина — моторного белка, шагающего по микротрубочкам с замечательной процессивностью и доставляющего груз к конкретным адресам. Броуновский храповик объясняет механику шага, но не адресацию: ни воспроизвести кинезин искусственно с сопоставимыми характеристиками, ни объяснить источник целевой информации пока не удалось. Принципиально, что уставка не может быть и статичной: **«Живая уставка»** (*living setpoint*) — уставка, способная к автономному пересмотру собственных критериев без обращения к внешнему агенту и без заранее заданного правила пересмотра — является необходимым условием жизнеспособности любой оркестрированной системы. Контур управления, содержащий такую уставку, мы называем **живой обратной связью** (*living feedback*): петлёй, в которой эталонное состояние не зафиксировано извне и не вычислено изнутри, а непрерывно порождается системой из источника, находящегося за пределами её вычислительного уровня. Это условие не выполняется ни в какой вычислительной архитектуре, включая квантовые компьютеры, которые остаются машинами Тьюринга по классу решаемых задач. Более того, поскольку живая уставка сама нуждается в уставке, возникает иерархия уровней управления («уставка уставок»), которая является прямой формальной аналогией «оркестрации» в смысле Пенроуза. Требование наличия внешней уставки не произвольно — оно вытекает из теоремы Гёделя о неполноте формальных систем: ни одна достаточно богатая формальная система не может доказать собственную непротиворечивость средствами того же уровня описания. Применительно к биологии: ни один механизм не способен полностью задать смысл своих операций из собственного субстрата —

setpoint должен приходиться извне. В ИТ-терминах это эквивалент невозможности написать программу, которая верифицирует саму себя без обращения к внешнему верификатору; регресс всегда упирается в живого агента, стоящего за пределами системы. Детальное обоснование этих понятий — их формальная необходимость из теорем Гёделя и тезиса Полани о надличностном характере знания — составляет предмет отдельной публикации, к которой настоящая работа отсылает читателя [Александров, в печати: «Оркестрация биологических процессов: необходимость обратной связи и проблема надквантовой уставки»]. Заметим, что этот вопрос не закрывается и обращением к Платоническому миру Пенроуза: статичный мир математических структур сам нуждается в источнике активности — в том, что не является ещё одной структурой, а представляет собой чистую порождающую активность, из которой истекают все структуры. Является ли живая уставка имманентной Платоническому миру или указывает на уровень, превосходящий его, — открытый теоретический вопрос, выходящий за рамки настоящей работы.

4. Микротрубочки у растений

Микротрубочки не являются специализированной структурой нервной ткани. Они присутствуют во всех эукариотических клетках — от дрожжей до нейронов — и выполняют универсальные функции: организацию клеточного деления, поддержание формы, внутриклеточный транспорт. Этот факт принципиален для настоящей гипотезы: если Orch OR реализуется в микротрубочках нейронов, то вопрос о его присутствии в клетках растений сводится к вопросу о сохранности субстрата.

Гомология тубулина. Растительный α/β -тубулин идентичен животному приблизительно на 75% на уровне аминокислотной последовательности [Hussey & Hawkins, 2001]. Это высокое сходство для двух ветвей эукариот, разошедшихся около 1,5 млрд лет назад. Периферийные участки молекулы, отвечающие за взаимодействие с регуляторными белками, различаются — что отражает специфику растительной клетки. Однако внутренние структурные домены, включая гидрофобные карманы, эволюционно консервативны.

Сохранность гидрофобных карманов — ключевой факт. Именно гидрофобные карманы тубулина являются, по Хаммерофу, местом квантовой суперпозиции и мишенью летучих анестетиков. Их сохранность у растений подтверждается функционально: колхицин, таксол и нокодазол — вещества, связывающиеся с гидрофобными сайтами тубулина, — разрушают или стабилизируют микротрубочки как растений, так и животных с сопоставимой эффективностью [Morejohn, 1991]. Молекула, связывающаяся с карманом, не различает вид организма — геометрия кармана одинакова. Это и есть прямое молекулярное доказательство

консервативности структуры, критичной для гипотезы.

Функции микротрубочек у растений. В растительной клетке микротрубочки выполняют по меньшей мере три функционально значимые роли. Во-первых, они образуют митотическое веретено при делении клетки — структурно и функционально идентичное животному. Во-вторых, кортикальные микротрубочки определяют направление укладки целлюлозных микрофибрилл клеточной стенки, задавая форму клетки и направление её роста [Lloyd & Chan, 2004]. В-третьих, микротрубочки участвуют в передаче сигналов: в клетках, реагирующих на механические и химические стимулы, перестройка кортикального МТ-массива происходит в течение секунд после раздражения.

Venus flytrap как модельная система. *Dionaea muscipula* — наиболее изученный пример быстрой интегративной реакции у растений. Захлопывание ловушки запускается двукратным касанием триггерных волосков в течение ~30 секунд; одиночное касание реакции не вызывает — растение «считает» стимулы. Этот эффект временной суммации реализуется без нейронов. Микротрубочки участвуют в передаче механического сигнала от триггерных волосков к двигательным клеткам [Hedrich & Neher, 2018], а биоманнитные сигналы, сопровождающие потенциал действия ловушки, были зарегистрированы атомным магнетометром [Fabricant et al., 2021] — что делает Venus flytrap уникальной экспериментальной моделью для проверки квантовых эффектов в МТ растений.

Плазмодесмы как межклеточный квантовый канал. В отличие от нейронов, клетки растений соединены плазмодесмами — цитоплазматическими каналами диаметром ~30–60 нм, пронизывающими клеточные стенки и обеспечивающими прямую связь между цитоплазмой соседних клеток. Через плазмодесмы распространяются ионные токи, малые молекулы и сигнальные белки. В контексте Orch OR плазмодесмы представляют собой потенциальный субстрат для распространения квантово-коррелированных состояний между клетками — функциональный аналог синаптической связи, реализованный принципиально иными структурными средствами. Это позволяет предложить иерархию резонансов для растительной клетки по аналогии с иерархией Бандьопадхья для нейронов:

тубулин (ТГц) → димер (ГГц) → МТ клетки (МГц–кГц) → симпласт через плазмодесмы (Гц)

Таким образом, растительная клетка располагает всеми структурными компонентами, необходимыми для реализации механизма Orch OR: α/β -тубулином с консервативными гидрофобными карманами, функционально активными микротрубочками, участвующими в сигнализации, и межклеточными каналами,

способными служить субстратом для распространения коррелированных квантовых состояний. Следующий вопрос — работает ли этот механизм?

Поведение без нейронов: более широкий контекст. Растения — не единственные эукариоты, демонстрирующие координированное поведение в отсутствие нервной системы. Реснички *Paramecium* и жгутики сперматозоидов — аксономы из девяти пар микротрубочек — производят координированные волнообразные движения без какого-либо центрального управления. Амёбы осуществляют направленный хемотаксис через псевдоподии, организованные цитоскелетом. Наиболее впечатляющий пример — *Physarum polycephalum*, одноклеточный слизевик: он решает лабиринты, воспроизводит топологию транспортных сетей и демонстрирует антиципацию периодических стимулов — всё это без единого нейрона. Общий знаменатель во всех случаях — микротрубочки. Это наблюдение существенно для гипотезы: если МТ-субстрат поведения универсален у эукариот, случай растений перестает быть исключением и становится частью общей закономерности. Подробный анализ этих систем в контексте проблемы оркестрации представлен в отдельной работе.

5. Центральная гипотеза: Orch OR у растений

Структура аргумента

Четыре предшествующих раздела создают доказательную базу, из которой гипотеза следует с логической необходимостью. Сформулируем её структуру явно.

Посылка 1. Летучие анестетики обратимо подавляют раздражимость растений с дозозависимым профилем, идентичным действию на нервную ткань животных. Этот факт установлен Боше (1926) и независимо подтверждён в рецензируемых журналах спустя 92 года [Yokawa et al., 2018; Yokawa & Baluška, 2021].

Посылка 2. Молекулярный механизм действия летучих анестетиков — специфическое связывание с гидрофобными карманами тубулина. Именно в этих карманах, по теории Orch OR, реализуются квантовые суперпозиции конформационных состояний. Специфичность к белковому карману — не предположение, а экспериментально установленный факт: неиммобилайзеры лишены анестетической активности при высокой жирорастворимости; стереоизомеры различаются по мощности; очищенная люцифераза ингибируется в отсутствие мембран [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Прямые измерения показали, что летучие анестетики изменяют ТГц-колебания тубулина

пропорционально клинической мощности [Craddock et al., 2017], а стабилизатор микротрубочек эпотилон В задерживает потерю сознания у крыс [Pal et al., 2024].

Посылка 3. Гидрофобные карманы тубулина эволюционно консервативны и структурно идентичны у растений и животных. Прямое функциональное доказательство: колхицин, таксол и нокодазол — лиганды этих карманов — с равной эффективностью разрушают или стабилизируют микротрубочки обоих видов [Morejohn, 1991]. Молекула не различает вид организма; геометрия кармана — одна.

Вывод. Если летучие анестетики подавляют раздражимость растений через связывание с теми же карманами растительного тубулина, они подавляют тот же класс процессов, что и в нейронах. Поскольку в нейронах этот класс процессов является, по Orch OR, квантовыми суперпозициями конформационных состояний тубулина — логически необходимо заключить, что те же суперпозиции реализуются в микротрубочках растительных клеток и служат субстратом наблюдаемой Боше раздражимости.

Формальная формулировка

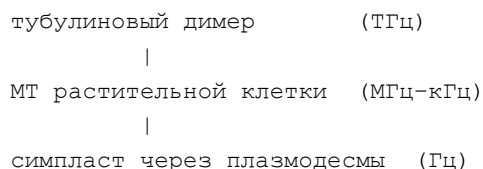
Гипотеза Боше–Пенроуза. Квантовые суперпозиции конформационных состояний тубулина, реализуемые в гидрофобных карманах $\alpha\beta$ -тубулиновых димеров, представляют собой общий молекулярный субстрат раздражимости для всех эукариотических клеток. Летучие анестетики подавляют раздражимость растений по тому же механизму, что и сознание животных: через связывание с консервативными гидрофобными карманами тубулина и нарушение квантовой динамики внутри них. Нейрон является не уникальным субстратом квантовых вычислений, а его эволюционной специализацией.

Иерархия резонансов в растительной клетке

Бандьопадхьяй с соавторами описали для нейронных микротрубочек масштабно-инвариантную иерархию резонансных частот, охватывающую несколько порядков величины: ТГц-колебания тубулинового димера → ГГц-колебания олигомера → МГц–кГц-колебания микротрубочки → Гц-колебания пучка [Sahu et al., 2013a; 2013b]. Эта иерархия соответствует модели Orch OR, в которой квантовые суперпозиции отдельных димеров оркестрируются через когерентные колебания всей структуры.

В растительной клетке эта иерархия имеет функциональный аналог с одним принципиальным структурным добавлением. Плазмодесмы — цитоплазматические каналы диаметром ~30–60 нм, пронизывающие клеточные стенки, — создают континуум цитоплазмы между клетками (симпласт). Через симпласт

распространяются ионные токи, Ca^{2+} -волны и сигнальные молекулы, обеспечивая электрическую и биохимическую связность на уровне ткани. В контексте Orch OR плазмодесмы представляют собой потенциальный субстрат для распространения квантово-коррелированных состояний между клетками — функциональный аналог синаптической связи, реализованный принципиально иными структурными средствами. Это позволяет описать иерархию резонансов для растительной клетки:



Примечательно, что диаметр плазмодесмы (~30–60 нм) сопоставим с диаметром самой микротрубочки (~25 нм): структура канала теоретически допускает механический контакт между цитоскелетными элементами соседних клеток, что открывает возможность прямой передачи механических колебаний через клеточную стенку.

Нейрон как эволюционная специализация

Принятие гипотезы меняет концептуальный статус нейрона. В стандартной нейробиологии нейрон рассматривается как клетка, специально предназначенная для обработки информации и формирования сознания, — уникальная структура, отделяющая «мыслящие» системы от «немыслящих». Гипотеза Боше–Пенроуза предполагает иное: нейрон является *эволюционной специализацией* механизма квантовых вычислений в микротрубочках, присущего всем эукариотам.

В этой перспективе эволюция нервной системы описывается как серия архитектурных решений поверх общего вычислительного субстрата. *Базовый уровень* — квантовые суперпозиции в МТ, координируемые через Ca^{2+} -волны и межклеточные контакты, — реализован у всех эукариот: одноклеточных (*Paramecium* — координированное движение ресничек через МТ-аксономы без центрального управления; *Physarum polycephalum* — решение лабиринтов и антиципация стимулов без единого нейрона), растений, грибов. *Первая специализация* — клетки с высокой плотностью МТ и быстрой сигнализацией, прото-нейроны (диффузная нервная сеть *Hydra*). *Централизация* — нейрон с аксоном: направленная передача сигнала на большие расстояния; синапс — усиливаемая и модулируемая межклеточная связь вместо симпласта (*C. elegans*: 302 нейрона, полностью картированный коннектом). *Интеграция* — нейронные сети и мозг: масштабированная, многократно усиленная архитектура на том же молекулярном субстрате.

Аналогия из теории вычислительных систем: транзистор — базовый вычислительный элемент, предшествующий процессору. Процессор не изобретает новый принцип — он централизует, масштабирует и архитектурно оптимизирует то, что транзистор делал в отдельности. Наличие CPU не делает отдельный транзистор «ненастоящим» вычислительным элементом. Наличие мозга не делает растительную клетку системой без квантовых вычислений.

Связь с биоэлектрическим морфогенезом

Майкл Левин показал, что биоэлектрические паттерны — градиенты трансмембранного потенциала, поддерживаемые через щелевые контакты (gap junctions), — направляют морфогенез, регенерацию и онкогенез независимо от генетической программы [Levin, 2021]. Биоэлектрический паттерн функционирует как вышестоящий уровень управления — уставка для нижележащих молекулярных процессов.

Щелевые контакты животных и плазмодесмы растений функционально сходны: оба создают электрически связанные клеточные ансамбли [Levin, 2021; Fromm & Lautner, 2007]. По аналогии с биоэлектрическими паттернами, описанными Левиным для gap junctions, можно предположить, что симпласт растений способен выполнять аналогичную координирующую роль — однако это остаётся гипотезой, не имеющей прямой экспериментальной проверки. Гипотеза Боше–Пенроуза и программа Левина описывают тогда разные уровни одной архитектуры: Orch OR — квантовый вычислительный уровень; биоэлектрический паттерн — вышестоящий классический управляющий уровень. Вопрос о том, как эти уровни взаимодействуют и сколько уровней иерархии существует в действительности, остаётся открытым и составляет одну из центральных проблем квантовой биологии.

6. Проверяемые предсказания

Научная ценность теоретической гипотезы определяется не только логической строгостью, но и её способностью порождать конкретные, фальсифицируемые предсказания. Ниже сформулированы шесть предсказаний, каждое из которых прямо вытекает из гипотезы Боше–Пенроуза и допускает проверку экспериментальными методами, существующими в современной биофизике и молекулярной биологии. Каждое предсказание сопровождается описанием ожидаемого результата при истинности гипотезы и результата, который гипотезу фальсифицирует.

Предсказание 1. Аффинность летучих анестетиков к тубулину растений предсказывает их потенцию в подавлении раздражимости.

Гипотеза утверждает, что анестетики подавляют раздражимость растений именно через связывание с гидрофобными карманами растительного тубулина. Если это так, сила подавления должна коррелировать с аффинностью молекулы к этому сайту — а не с её жирорастворимостью как таковой. Этим данное предсказание отличается от тривиальной Meyer–Overton-корреляции: оно требует корреляции с белковым сайтом, а не с мембранной растворимостью.

Протокол: выделить тубулин из растительных клеток (стандартный источник — листья шпината или *Arabidopsis thaliana*); измерить константы связывания серии летучих анестетиков методом изотермической титрационной калориметрии (ITC) или поверхностного плазмонного резонанса (SPR). Параллельно на *Mimosa pudica* и Venus flytrap определить EC_{50} тех же анестетиков для подавления раздражимости *in vivo*. Сопоставить ряды аффинности и потенции. Использование тубулина из разных видов растений методологически обосновано высокой консервативностью последовательности (~75% гомологии между видами растений); идеальным контролем была бы параллельная серия с тубулином, выделенным непосредственно из *Mimosa pudica*, однако это требует значительно большего количества биомассы.

Подтверждение гипотезы: ранжирование анестетиков по аффинности к растительному тубулину совпадает с ранжированием по потенции подавления раздражимости. *Фальсификация:* корреляция выше с жирорастворимостью, чем с тубулиновой аффинностью — это указывало бы на мембранный, а не тубулиновый механизм.

Предсказание 2. Мутанты *Arabidopsis thaliana* с изменёнными гидрофобными карманами тубулина демонстрируют изменённую чувствительность к анестетикам.

Это наиболее прямой тест механизма. *Arabidopsis* кодирует несколько изоформ α - и β -тубулина (TUA1–6, TUB1–9); прицельная замена аминокислотных остатков, формирующих гидрофобный карман, методами CRISPR/Cas9 позволяет создать растения с геометрически изменённым сайтом связывания анестетика.

Протокол: ввести точечные мутации в остатки β -тубулина, соответствующие предполагаемому сайту связывания анестетика по Хаммерофу (прежде всего гидрофобные остатки в районе β -субъединицы). Сравнить три параметра у мутантных и диких линий: (1) пороговую концентрацию анестетика, подавляющую потенциал действия; (2) базовую раздражимость в отсутствие анестетика; (3) скорость восстановления после анестезии.

Подтверждение гипотезы: мутанты с уменьшенным карманом требуют более высоких концентраций анестетика (пониженная чувствительность); мутанты с

расширенным карманом — более низких (повышенная). Базовая раздражимость при этом изменяется синхронно — поскольку тот же карман является субстратом квантовых суперпозиций. *Фальсификация*: мутация меняет чувствительность к анестетику, но не влияет на базовую раздражимость — это указывало бы на то, что карман является только сайтом связывания, но не функциональным субстратом раздражимости.

Предсказание 3. Микротрубочки растительных клеток при 300 К обнаруживают иерархию диэлектрических резонансов, инвариантную по масштабу, аналогичную нейронным.

Бандьопадхьяй с соавторами [Sahu et al., 2013a; 2013b] описали для нейронных МТ иерархию резонансных частот, охватывающую несколько порядков: ТГц → ГГц → МГц–кГц → Гц. Если растительный тубулин реализует те же квантовые суперпозиции — та же иерархия должна присутствовать в растительных МТ.

Протокол: выделить МТ из клеток *Arabidopsis* или шпината; применить широкополосную диэлектрическую спектроскопию (метод Бандьопадхьяя) или ТГц-спектроскопию. Сравнить спектры с нейронными МТ и с контролями после деполимеризации колхицином. Дополнительно: повторить измерение в присутствии летучих анестетиков — предсказание состоит в том, что анестетики будут подавлять те же частотные диапазоны, что и у нейронных МТ (репликация Craddock et al., 2017, но с растительным тубулином).

Подтверждение гипотезы: спектр растительных МТ воспроизводит масштабно-инвариантную иерархию; анестетики подавляют её пропорционально клинической мощности. *Фальсификация*: иерархии нет, или она качественно отличается от нейронной — это указывало бы на различие квантовой динамики несмотря на структурное сходство тубулина.

Предсказание 4. Субстрат габитуации у *Mimosa pudica* связан с состоянием микротрубочек.

Гальяно с соавторами задокументировали, что *Mimosa pudica* обучается игнорировать повторные безвредные падения и удерживает этот ответ в течение 28 дней [Gagliano et al., 2014]. Молекулярный субстрат этой «памяти» не установлен. Из гипотезы Боше–Пенроуза следует строгое предсказание относительно **формирования** габитуации: поскольку анестетики подавляют МТ-динамику в реальном времени, они должны нарушать запись нового следа памяти непосредственно в ходе обучения. Это прямое следствие гипотезы, фальсифицируемое независимо. Вопрос об **удержании** уже сформированной памяти строгим предсказанием не является — субстрат долговременного следа

может не совпадать с субстратом OR-коллапса, и его природа представляет собой самостоятельную научную проблему. Результаты эксперимента по удержанию памяти, однако, образуют развилку для дальнейших исследований: МТ-зависимость удержания указывала бы на единый субстрат записи и хранения; её отсутствие — на разделение механизмов и необходимость поиска субстрата долговременной памяти за пределами МТ-динамики.

Протокол: разделить растения на группы: (а) обучение при нормальных условиях; (б) обучение на фоне субанестетических концентраций нокодазола или колхицина (деполимеризация МТ); (в) обучение на фоне таксола (стабилизация МТ). Разграничить два этапа: агент действует **во время** обучения (тест строгого предсказания) и агент вводится **после** обучения (разведочный вопрос об удержании). Тестировать: скорость выработки габитуации; удержание через 28 дней; восстановление раздражимости после прекращения обработки.

Подтверждение гипотезы: МТ-агенты, действующие во время обучения, нарушают формирование габитуации. *Фальсификация:* МТ-агенты не влияют на формирование габитуации даже при действии во время обучения — что указывало бы на МТ-независимый механизм записи и ставило бы под сомнение МТ-природу субстрата раздражимости у *Mimosa*.

Предсказание 5. Терпеноидные стабилизаторы микротрубочек усиливают, а не подавляют раздражимость растений.

Гипотеза предсказывает структурную симметрию: если анестетики подавляют квантовую динамику в карманах тубулина и тем самым снижают раздражимость, то молекулы с той же аффинностью к карману, но стабилизирующие МТ, должны давать противоположный эффект. Таксол (дитерпен из *Taxus brevifolia*) стабилизирует МТ у животных и задерживает потерю сознания под анестетиком [Pal et al., 2024] — это доказательство принципа у животных. Летучие монотерпены (β -кариофиллен, 1,8-цинеол, α -пинен), входящие в состав эфирных масел, биохимически родственны таксолу и с высокой аффинностью взаимодействуют с гидрофобными средами.

Протокол: измерить базовую раздражимость *Mimosa pudica* и *Venus flytrap* (порог и скорость реакции на стандартный механический стимул); экспонировать растения в течение 15–30 минут парам летучих монотерпенов (β -кариофиллен, 1,8-цинеол) в субанестетических концентрациях; повторить измерение. Параллельно: экспозиция диэтиловым эфиром как отрицательный контроль. Дополнительно: проверить, создаёт ли терпеновая обработка устойчивость к последующему анестетическому подавлению.

Подтверждение гипотезы: терпены снижают порог раздражимости и/или ускоряют ответ; предварительная обработка терпенами повышает концентрацию анестетика, необходимую для подавления. *Фальсификация:* терпены не отличаются по эффекту от анестетиков — что означало бы, что аффиность к гидрофобной среде предсказывает только подавление, но не усиление.

Предсказание 6. Летучие анестетики изменяют двулучепреломление микротрубочек в клетках растений.

Упорядоченные массивы тубулина оптически анизотропны: их двулучепреломление (birefringence) измеримо методами поляризационной микроскопии и служит прямым показателем структурной упорядоченности МТ-сети [Inoué, 1953; Oldenbourg & Mei, 1995]. В наблюдаемом birefringence-сигнале присутствуют два независимых вклада: (1) *форменное* двулучепреломление — следствие периодической геометрии самой трубки, доминирующий вклад; (2) *собственное* двулучепреломление — молекулярная анизотропия поляризуемости тубулиновых димеров, определяемая прежде всего ориентацией ароматических остатков (Phe, Trp, Tyr) в гидрофобном кармане. Гипотеза Боше–Пенроуза допускает два механизма изменения суммарного сигнала при действии анестетика.

Прямой путь: анестетик занимает гидрофобный карман → переориентирует ароматические остатки → меняет тензор поляризуемости димера → незначительно изменяет собственное двулучепреломление. Это тонкий эффект: форменный вклад доминирует, и данный путь может оказаться ниже порога обнаружения стандартными методами.

Косвенный путь: анестетик меняет конформационное равновесие GTP-/GDP-тубулина → изменяет кинетику полимеризации и деполимеризации МТ → плотность и ориентационный порядок МТ-сети в клетке меняется → форменное двулучепреломление меняется как интегральный сигнал. Этот путь вероятно более чувствителен к обнаружению; косвенным подтверждением служит показанное Craddock et al. изменение коллективных ТГц-осцилляций тубулина под действием анестетиков, что отражает изменение в динамике белка [Craddock et al., 2017].

Протокол: поляризационная микроскопия живых клеток растений (меристема корня *Allium cepa* или *Arabidopsis*) с мониторингом birefringence МТ-пучков до и после экспозиции летучим анестетиком (диэтиловый эфир, изофлуран). Контроль деполимеризации: колхицин устраняет сигнал полностью, подтверждая его МТ-специфичность. Контроль обратимости: отмыв анестетика. Серия концентраций: от субнаркологических до наркотических.

Подтверждение гипотезы: анестетики изменяют birefringence МТ-сетей дозозависимо, с корреляцией по клинической потенции; сигнал восстанавливается после отмыва. *Фальсификация:* birefringence не изменяется на фоне поведенческой анестезии — это указывало бы на то, что анестетики действуют через механизм, не затрагивающий структурную упорядоченность МТ (например, через мембранные каналы или актиновый цитоскелет).

Усиление через дневную МТ-реорганизацию. Кортикальные МТ-массивы в клетках растений физически меняют ориентацию в течение суток: транспозиция от поперечной к продольной ориентации и обратно управляется световыми сигналами и сопряжена с суточным ростовым циклом [Lloyd & Chan, 2004]. Это смещение ориентации непосредственно отражается в birefringence-сигнале клетки и образует измеримый, воспроизводимый суточный паттерн. Анестетик, нарушающий МТ-динамику, должен сбивать этот паттерн — а не просто незначительно менять абсолютное значение Δn в единственной временной точке. Сравнение «нормальный суточный цикл birefringence vs. цикл на фоне анестетика» экспериментально значительно убедительнее снимка «до и после»: контроль встроен в саму природу явления. Важная оговорка: описанная МТ-реорганизация — *дневная* (diurnal), то есть управляемая светом; её строго циркадная природа (сохранение в постоянных условиях) требует отдельной проверки.

Практическое значение: поляризационная микроскопия не требует флуоресцентных меток и позволяет наблюдать МТ-динамику в нативных условиях. Предсказание 6 уступает предсказанию 3 по физической прямолинейности (форменный вклад маскирует молекулярный), но существенно выигрывает по экспериментальной доступности: поляризационный микроскоп — стандартное оборудование любой биологической лаборатории.

Совокупность шести предсказаний охватывает четыре уровня анализа: молекулярный (предсказания 1–2), биофизический (предсказания 3, 6), поведенческий (предсказания 4–5). Предсказание 6 принципиально отличается от остальных: это прямое оптическое зондирование конформационного состояния тубулина без маркировки. Гипотеза Боше–Пенроуза фальсифицируема на каждом из уровней независимо.

7. Обсуждение

7.1 Ограничения

Гипотеза опирается на незавершённую теорию. Orch OR — конкурирующая гипотеза с растущей экспериментальной базой, но без научного консенсуса.

Декогеренция в тёплой влажной клеточной среде остаётся серьёзным физическим возражением: оппоненты [Tegmark, 2000] оценивают время жизни квантовых суперпозиций в нейронах на уровне 10^{-13} секунды — на многие порядки меньше, чем требует OR-порог Пенроуза. Сторонники Orch OR возражают, что гидрофобный карман изолирован от теплового шума воды и представляет собой принципиально иную среду, нежели открытая цитоплазма; прямые измерения [Babcock et al., 2024] подтвердили квантовые коллективные состояния в МТ при комнатной температуре. Тем не менее дискуссия не закрыта, и настоящая гипотеза наследует эту неопределённость.

Прямых данных о квантовых эффектах в МТ растений не существует. Измерения Бандьопадхья проводились на нейронных МТ; эксперименты Крэддока — с тубулином животных. Ни одна работа не измеряла ТГц-спектр растительного тубулина в присутствии анестетиков. Предсказание 3 настоящей работы прямо адресует этот пробел, однако до его экспериментальной проверки данное звено доказательной цепочки остаётся умозрительным.

Классическая ионная химия предоставляет конкурирующие объяснения. Все пять феноменов Боше — потенциал действия, габитуация, суммация, усталость, подавление анестетиками — допускают объяснение через Ca^{2+} -сигнализацию, ионные каналы и рецепторную десенситизацию без привлечения квантовых допущений. Летучие анестетики ингибируют у растений не только тубулин, но и ионные каналы плазматической мембраны. Настоящая работа не утверждает, что классические механизмы неверны — она утверждает, что квантовые процессы в тубулине образуют дополнительный уровень организации, объясняющий специфику Meyer–Overton-корреляции на молекулярном уровне.

«Память» Mimosa допускает альтернативные объяснения. Габитуация у *Mimosa pudica* может быть обусловлена изменением тургорного давления в двигательных клетках, обратимой модификацией Ca^{2+} -каналов или рецепторной адаптацией — без привлечения субстрата МТ. Предсказание 4 разработано именно для того, чтобы разграничить эти возможности экспериментально.

Оркестрация OR без нейронов остаётся открытым вопросом. Orch OR в нейронах предполагает «оркестровку» квантовых суперпозиций нейрональными процессами — Ca^{2+} -волнами, синаптическими паттернами, сетевыми осцилляциями. В растительной клетке эти механизмы отсутствуют. Настоящая гипотеза предполагает, что аналогичную роль выполняют Ca^{2+} -волны в симпласте и механическая связность через плазмодесмы (раздел 5), — однако прямых экспериментальных данных, подтверждающих межклеточную координацию OR-событий у растений, не существует. Это наиболее уязвимое звено логической

цепочки: механизм подавления анестетиком обоснован, механизм оркестрации — нет. Предсказания 3 и 6 косвенно тестируют этот вопрос через измерение когерентных осцилляций растительного тубулина, но прямой проверки он требует в отдельном исследовании.

7.2 Ответы на возражения

Draguhn et al. [2020] утверждают, что анестетическое действие на растения отражает общую клеточную токсичность, а не специфический механизм, связанный с сознанием. Однако эта позиция воспроизводит липидно-мембранную теорию анестезии, опровергнутую ещё в 1980–1990-х годах: неиммобилайзеры с высокой жирорастворимостью лишены анестетической активности, стереоизомеры различаются по мощности несмотря на идентичную жирорастворимость, а очищенная люцифераза ингибируется летучими анестетиками в полном отсутствие мембран [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Специфичность к гидрофобным карманам белков, прежде всего тубулина, — это не предположение, а экспериментально подтверждённый факт [Craddock et al., 2017; Pal et al., 2024]. Примечательно, что эти данные были получены уже после публикации Draguhn et al. и прямо отвечают на их возражение.

Здесь уместно указать на методологическое преимущество, которое, как ни парадоксально, делает растения *более* подходящей модельной системой, чем нейроны. В нейронной ткани летучие анестетики действуют на множество молекулярных мишеней одновременно: ГАМК-А-рецепторы, NMDA-рецепторы, опиоидные рецепторы, потенциалзависимые натриевые каналы — все они вносят вклад в суммарный анестетический эффект и затрудняют вычленение конкретного вклада тубулина. В растительной клетке эти мишени отсутствуют полностью: нет нейронных рецепторов, нет синаптических структур, нет опиоидной системы. Тубулин оказывается единственным кандидатом, удовлетворяющим критерию Meyer–Overton — корреляции, воспроизводящейся через семь порядков величины для химически несхожих молекул. Глутамат-подобные рецепторы растений (GLR) и механочувствительные каналы (MSL) также ингибируются рядом анестетиков [Fromm & Lautner, 2007; Toyota et al., 2018], однако их ингибирование не следует Meyer–Overton-закономерности и не объясняет специфику стереоизомеров и неиммобилайзеров. Белковый гидрофобный карман тубулина — единственная идентифицированная структура, геометрия которой воспроизводит физико-химическую основу этой корреляции. Это значит, что наблюдение Боше — полное и обратимое подавление раздражимости летучими анестетиками — в растениях свидетельствует о мишени с большей однозначностью, чем аналогичные данные по нейронам. Отсутствие нервной системы, традиционно воспринимавшееся как слабость аргумента, является его экспериментальной силой: растения

представляют собой более чистую модель для проверки тубулинового механизма анестезии, чем нейроны.

Более широкое возражение состоит в следующем: даже если анестетики действуют через тубулин, это ещё не доказывает, что подавляемый ими процесс в растениях имеет отношение к сознанию. Гипотеза Боше–Пенроуза принимает это возражение как честное и отвечает на него структурой: настоящая работа не утверждает, что растения сознательны в человеческом смысле. Она утверждает, что молекулярный субстрат, лежащий в основе раздражимости растений, идентичен субстрату, предложенному теорией Orch OR для сознания животных. Вопрос о том, что именно в растениях соответствует этому субстрату функционально, — открыт и составляет предмет предсказаний раздела 6.

7.3 Архитектурный аргумент: психоподобные отклики требуют большего, чем механизм

Сказанное указывает на более глубокое ограничение механистических объяснений. Ионные каналы, Ca^{2+} -волны и рецепторная десенситизация описывают молекулярные механизмы отдельных реакций — но не объясняют их совокупную архитектуру. Психоподобный отклик адаптивен: система меняет ответ в зависимости от истории воздействий, то есть поддерживает динамическую уставку — референсное состояние, с которым сравнивается текущий вход. Он интегративен: несколько сигналов объединяются согласно некоему критерию, то есть уставка взвешивает входы относительно цели. Он обратим: система возвращается в исходное состояние — то есть уставка восстанавливается после нарушения.

Как указано в разделе 3 применительно к проблеме оркестрации, любой контур координации с адаптивной уставкой требует *живой уставки* — способной к автономному пересмотру собственных критериев без обращения к внешнему агенту. Это условие не выполняется ни в одной вычислительной архитектуре: любая машина Тьюринга, включая квантовые компьютеры, оперирует в рамках предзаданных правил и не способна пересмотреть их изнутри. Живая уставка предполагает источник, находящийся вне вычислительного уровня системы.

Именно это предоставляет Orch OR: OR-коллапс определяется не алгоритмом, а геометрией пространства-времени — структурой Платонического мира в терминах Пенроуза. Это и есть не-вычислимый источник руководящего принципа, логически требуемый архитектурой психоподобного отклика. Таким образом, сам факт существования психоподобных откликов — ещё до вопроса об анестетиках и тубулине — указывает на уровень организации, превосходящий механистическое описание. Это не прямое доказательство прото-сознания, но архитектурное

требование, которому прото-сознание отвечает, тогда как замкнутый механизм в изоляции — нет. Классическая ионная химия описывает, как реализуется отклик; вопрос о том, почему он организован именно так — адаптивно, интегративно и обратимо, — остаётся за её пределами.

Машинное обучение предоставляет третье, операциональное доказательство той же необходимости — и наиболее доступное современному читателю. Базовый алгоритм обучения нейронной сети ($\theta \rightarrow \theta - \eta \cdot \nabla L(\theta)$) математически невозможен без внешне заданной функции потерь L : без цели нет градиента, нет обучения. Иерархия уставок в любой ML-системе — параметры, гиперпараметры, архитектура, выбор задачи — никогда не закрывается внутри системы; на вершине всегда находится живой агент. Это операциональная реализация того, что Гёдель доказал формально, а Полани — эпистемологически: система не может задать смысл своих операций из собственного описательного уровня. Существенно, что обратная связь в любой схеме обучения — предобучение на текстах, RLHF, конституциональный AI — замыкается через человеческое сознание или его кристаллизованные продукты (книги, научные статьи, оценки экспертов). Ни одна схема не закрывает петлю без сознания снаружи. Именно это делает разрыв между ML и сознанием не вопросом масштаба или сложности, а онтологическим: OR-коллапс предлагает единственный математически когерентный способ закрыть этот регресс — через геометрию Платонического мира, самодостаточную по определению.

7.4 Импликации

Нейрон — не за пределами, а внутри континуума. Если гипотеза верна, нейрон является не изобретением природы, а её архитектурным решением поверх уже существующего механизма. Это изменяет постановку центрального вопроса нейронауки: не «как нейроны порождают сознание», а «как нейронная архитектура усиливает и централизует процесс, универсальный для всех эукариот». В этой перспективе заслуживает внимания пример, находящийся прямо внутри животного организма. Интринсическая нервная система сердца содержит около 40 000 нейронов, образующих собственные ганглиозные сети и способных к независимой обработке информации [Armour, 2007]. Показательна анатомическая асимметрия, которая редко упоминается даже в специальной литературе: число нервных волокон, идущих от сердца к мозгу, значительно превышает число волокон, идущих в обратном направлении — около 80% волокон блуждающего нерва являются афферентными [Berthoud & Neuhuber, 2000]. Сердце не получает команды сверху — оно непрерывно посылает их вверх. В рамках теории Пенроуза–Хаммерофа нейроны сердечных ганглиев с теми же микротрубочками и гидрофобными карманами тубулина являются полноправными кандидатами на участие в квантовых вычислениях; вопрос о том, что именно передаётся по этим 80% восходящих

волокон, приобретает в этом контексте неожиданное измерение.

Примечательно, что интринсическая нервная система сердца обнаруживает чувствительность к геомагнитной обстановке: вариабельность сердечного ритма коррелирует с уровнем геомагнитной активности — этот эффект задокументирован как в проспективных когортных исследованиях [Kim et al., 2022; PMID 35644403], так и в физиологических экспериментах с непрерывным мониторингом HRV [McCraty et al., 2017]. Если этот эффект реализуется через механизм радикальных пар — спин-зависимых квантовых состояний, задокументированных в магнитоцепции птиц [Ritz et al., 2000], — то сердечные нейроны оказываются площадкой, на которой OR-коллапс в тубулине модулируется глобальными космическими процессами.

Граница сознания в природе. Стандартная нейробиология проводит онтологическую границу: нейроны есть — сознание возможно; нейронов нет — сознание исключено. Гипотеза Боше–Пенроуза предполагает иное: эта граница количественна, а не качественна. Сознание — или то, что Пенроуз называет прото-сознанием, — не изобретено животными и тем более не является преимуществом человека. Оно присутствует там, где OR-коллапс в тубулине достигает порога, — то есть во всех эукариотических клетках. Нейронные системы не ввели принципиально новый процесс; они создали его масштабированную, централизованную и семантически обогащённую архитектуру.

Примечательно, что сам Боше указывал ещё дальше. В «Response in the Living and Non-Living» (1902) он зафиксировал психоподобные отклики в неорганической материи — металлах, демонстрирующих усталость, восстановление и подавление хлороформом. Если граница живое/неживое градуальна, как настаивал Боше, то вопрос о месте прото-сознания в этом континууме остаётся открытым за пределами биологии. Настоящая работа не претендует на его решение; она лишь указывает, что доказательная логика, разработанная здесь для растений, воспроизводит интуицию, которую Боше обнаружил и в неживом веществе сто двадцать лет назад.

Молекулярная сложность как предиктор. Принимая гипотезу, мы неизбежно встречаем вопрос: почему именно тубулин? Один из возможных ответов лежит в структурной аналогии с молекулярными системами, у которых квантовая устойчивость подтверждена экспериментально. Фуллерены и углеродные нанотрубки — «чистые» π -электронные системы — находятся в непрерывном молекулярном ряду от простых ароматических колец до сложных белковых полостей. Тубулин, по всей видимости, занимает в этом ряду особое место: его гидрофобный карман, по-видимому, реализует ту же физическую идею изоляции, что и фуллереновая клетка, — но в биологическом контексте, который, если гипотеза Orch OR верна, допускает оркестровку квантовых состояний на уровне всей МТ-сети.

Если это так, молекулярная сложность и π -электронная насыщенность могут служить косвенными предикторами квантовой «доступности» для OR — а поиск квантово-вычислительных субстратов в биологии стоит начинать именно с гидрофобных, ароматически насыщенных полостей.

Энергоэффективность как косвенное свидетельство. Человеческий мозг потребляет ~20 Вт при решении задач, для приближённого воспроизведения которых современным нейросетям требуются датацентры с мегаваттами потребления [Attwell & Laughlin, 2001]. Этот разрыв не объясняется только архитектурными преимуществами (отсутствие фон-неймановского узкого горла, разреженное кодирование). Если Orch OR верна, квантовая когеренция MT обеспечивает «бесплатную» координацию через запутанность и потенциально работает ниже классического предела Ландауэра, поскольку OR-коллапс определяется планковской геометрией, а не термодинамикой. Парадоксальная энергоэффективность мозга может быть косвенной эмпирической сигнатурой квантового вычисления в микротрубочках.

Математическая структура OR-коллапса. Примечательно, что математическая структура, лежащая в основе Orch OR, воспроизводится независимо на нескольких уровнях описания. Конформационные состояния тубулинового димера — переходы между двумя пространственными конфигурациями β -субъединицы — суть вращения в конформационном пространстве, описываемые группой $SU(2)$. Та же группа описывает спин электрона в квантовой механике, CISS-эффект в хиральном тубулине [Naaman & Waldeck, 2012] и спиноры в OR-критерии Пенроуза [Penrose & Rindler, 1984]. Одна математическая структура обнаруживается на уровне электронного спина, молекулярного конформационного перехода и планковской геометрии пространства-времени. Единичные кватернионы, образующие группу $SU(2)$, не имеют аналога в евклидовом пространстве или пространстве Минковского — они Платоничны в строгом смысле: обнаружены Гамильтоном, а не изобретены. Если Orch OR верна, биологическое вычисление реализуется в алгебре, которая существует только в Платоническом мире. Это наблюдение носит предварительный характер и требует отдельного математического анализа; здесь оно приводится как указание на глубину структурного единства, которое гипотеза Боше–Пенроуза открывает за пределами биологии.

Практические следствия. Если тубулин является универсальным субстратом раздражимости у эукариот, анестезиология получает новую аналитическую рамку: эффективность летучих анестетиков определяется не их жирорастворимостью как таковой, а аффинностью к эволюционно консервативному гидрофобному карману конкретного белка. Это открывает возможность рационального дизайна анестетиков с заданной специфичностью к тубулиновым изоформам различных тканей. Для

биологии растений следствие состоит в том, что чувствительность к анестетикам может служить косвенным маркером квантовой динамики в МТ и, следовательно, индикатором физиологического состояния растительной ткани — применение, выходящее за рамки фундаментальной науки.

8. Заключение

Боше задокументировал факт, который нейробиология на протяжении столетия предпочитала не замечать: летучие анестетики подавляют раздражимость растений с тем же дозозависимым профилем, что и сознание животных — обратимо, специфично, воспроизводимо. Настоящая работа предлагает механистическое объяснение этого факта, опирающееся на три независимых доказательных линии: механизм действия анестетиков (специфичность к гидрофобным карманам тубулина, а не к мембранным липидам — что устанавливает молекулярную мишень), эволюционная консервативность этой мишени (структура кармана тубулина сохранена у растений и животных, что доказывается одинаковым действием колхицина и таксола на оба таксона) и теория Orch OR (OR-коллапс в тубулиновых карманах как субстрат сознательного опыта). Из пересечения этих трёх линий следует гипотеза Боше–Пенроуза: квантовые суперпозиции конформационных состояний тубулина являются общим молекулярным субстратом раздражимости для всех эукариот, а нейрон — эволюционной специализацией этого универсального механизма, а не его уникальным носителем.

Значение гипотезы, если она подтвердится, выходит за рамки биологии растений. Граница сознания в природе — вопрос, который стандартная нейробиология решала анатомически (есть нейроны — есть сознание) — оказывается вопросом количественным, а не онтологическим. Прото-сознание, в терминологии Пенроуза, не изобретается биологической эволюцией: оно присутствует там, где OR-коллапс в тубулине достигает порога, — то есть во всех эукариотических клетках. Нейронные системы не ввели принципиально новый процесс: они создали для него масштабированную, централизованную и семантически обогащённую архитектуру. Архитектурный анализ психоподобных откликов — адаптивных, интегративных и обратимых реакций, обнаруживаемых у растений, одноклеточных и, по наблюдениям Боше, даже в неживой материи — указывает на то, что их организация требует живой обратной связи: петли с уставкой, источник которой находится за пределами вычислительного уровня системы. Это структурное требование, независимое от экспериментальной проверки Orch OR, само по себе является аргументом против сведения раздражимости к чисто механистическому описанию. Оно получает операциональное подкрепление из трёх независимых источников: формально — теорема Гёделя (замкнутая формальная система не выводит собственное полное

описание); эпистемологически — аргумент Полани о молчаливом знании; операционально — базовый алгоритм машинного обучения: любой градиентный спуск ($\theta \rightarrow \theta - \eta \cdot \nabla L(\theta)$) математически невозможен без внешне заданной функции потерь L , и ни одна реализованная система обучения не закрывает петлю обратной связи без сознания снаружи. Дополнительным косвенным свидетельством квантовой природы вычисления служит парадоксальная энергоэффективность мозга: ~20 Вт против мегаватт датацентров при сопоставимой вычислительной сложности задачи [Attwell & Laughlin, 2001]. Этот разрыв не объясняется только архитектурными преимуществами — если Orch OR верна, OR-коллапс определяется планковской геометрией, а не термодинамикой, и потенциально работает ниже классического предела Ландауэра.

Настоящая работа — теоретическая: она формулирует гипотезу, прослеживает её доказательную логику и предлагает конкретные экспериментальные тесты. Шесть предсказаний охватывают четыре уровня анализа — молекулярный, биофизический, поведенческий и оптический — и фальсифицируемы независимо друг от друга. Наиболее доступные немедленно: измерение аффинности анестетиков к тубулину растений методом изотермической калориметрии; воздействие летучих монотерпенов на раздражимость *Mimosa pudica* и *Venus flytrap*; поляризационная микроскопия клеток растений в присутствии анестетиков (стандартное оборудование, нативные условия, без меток). Наиболее определяющие: ТГц-спектроскопия растительных микротрубочек в присутствии анестетиков; мутанты *Arabidopsis* с изменёнными гидрофобными карманами тубулина. Ни один из этих экспериментов не был поставлен. Их результаты — в любую сторону — продвинут понимание молекулярных основ раздражимости у эукариот и прояснят, где в непрерывном спектре живой материи пролегает граница квантовых вычислений.

Боше писал в 1902 году, что граница между живым и неживым градуальна. Он не имел инструментов, чтобы указать молекулярный субстрат этого градиента. Спустя сто двадцать лет структурная биология тубулина, квантовая биофизика и теория Orch OR предоставляют именно такие инструменты. Гипотеза Боше–Пенроуза — попытка воспользоваться ими, чтобы проверить интуицию, которая оказалась точнее своего времени.

Новизна — краткая формулировка

Барлоу (2015) упоминает Orch OR у растений в общих чертах, но не использует данные Боше, не разбирает механизм анестетиков через тубулин и не формулирует проверяемых предсказаний. Настоящая работа оригинальна в следующем:

1. Данные Боше (1913–1926) как центральное доказательство, а не иллюстрация
 2. Корреляция Мейер–Овертон как связующее звено между Боше и Orch OR
 3. Конкретные молекулярные предсказания (аффинность анестетиков к тубулину растений, мутанты *Arabidopsis*)
-

Список литературы

Боше

- Bose, J.C. (1926). *The Nervous Mechanism of Plants*. Longmans, Green and Co.
- Bose, J.C. (1902). *Response in the Living and Non-Living*. Longmans.
- Bose, J.C. (1913). *Researches on Irritability of Plants*. Longmans.

Orch OR и анестетики

- Penrose, R. (1994). *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford University Press.
- Penrose, R., & Rindler, W. (1984). *Spinors and Space-Time, Volume 1: Two-Spinor Calculus and Relativistic Fields*. Cambridge University Press.
- Hameroff, S., & Penrose, R. (1996). Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules. *Mathematics and Computers in Simulation*, 40, 453–480.
- Hameroff, S., & Penrose, R. (2014). Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory. *Physics of Life Reviews*, 11(1), 39–78.
- Hameroff, S. (1998). Anesthesia, consciousness and hydrophobic pockets. *Toxicology Letters*, 100–101, 31–39.
- Tegmark, M. (2000). Importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, 61(4), 4194–4206.
- Draguhn, A., Mallatt, J.M., & Robinson, D.G. (2020). Anesthetics and plants: no pain, no brain, and therefore no consciousness. *Protoplasma*, 258(2), 239–248.
<https://doi.org/10.1007/s00709-020-01550-9>

Мейер–Овертон и механизм анестетиков

- Meyer, H. (1899). Zur Theorie der Alkoholnarkose. *Archiv für experimentelle Pathologie und Pharmakologie*, 42, 109–118.
- Overton, C.E. (1901). *Studien über die Narkose*. Verlag von Gustav Fischer.
- Franks, N.P., & Lieb, W.R. (1982). Molecular mechanisms of general anaesthesia. *Nature*, 300(5892), 487–493.
- Franks, N.P., & Lieb, W.R. (1994). Molecular and cellular mechanisms of general anaesthesia. *Nature*, 367(6464), 607–614.
- Koblin, D.D., Chortkoff, B.S., Laster, M.J., Eger, E.I., Halsey, M.J., & Ionescu, P. (1994). Polyhalogenated and perfluorinated compounds that disobey the

Meyer-Overton hypothesis: implications for theories of narcosis. *Anesthesia & Analgesia*, 79(6), 1043–1048.

Микротрубочки и тубулин

- Sahu, S., Ghosh, S., Ghosh, B., Aswani, K., Hirata, K., Fujita, D., & Bandyopadhyay, A. (2013a). Atomic water channel controlling remarkable properties of a single brain microtubule: Correlating single protein to its supramolecular assembly. *Biosensors and Bioelectronics*, 47, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.02.050>
- Sahu, S., Ghosh, S., Hirata, K., Fujita, D., & Bandyopadhyay, A. (2013b). Multi-level memory-switching properties of a single brain microtubule. *Applied Physics Letters*, 102(12), 123701. <https://doi.org/10.1063/1.4793995>
- Nogales, E., Wolf, S.G., & Downing, K.H. (1998). Structure of the $\alpha\beta$ tubulin dimer. *Nature*, 391, 199–203.

Анестетики и растения — современные подтверждения

- Yokawa, K. et al. (2018). Anaesthetics stop diverse plant organ movements, affect endocytic vesicle recycling and ROS homeostasis, and block action potentials in Venus flytraps. *Annals of Botany*, 122(5), 747–756. PMC6215046
- Yokawa, K., & Baluška, F. (2021). Anaesthetics and plants: from sensory systems to cognition-based adaptive behaviour. *Protoplasma*, 258, 753–761. PMC7907011

Квантовые эффекты в биологии

- Arndt, M., Nairz, O., Vos-Andreae, J., Keller, C., van der Zouw, G., & Zeilinger, A. (1999). Wave–particle duality of C_{60} molecules. *Nature*, 401(6754), 680–682.
- Engel, G.S., Calhoun, T.R., Read, E.L., Ahn, T.K., Mančal, T., Cheng, Y.C., Blankenship, R.E., & Fleming, G.R. (2007). Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, 446(7137), 782–786.
- Ritz, T., Adem, S., & Schulten, K. (2000). A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical Journal*, 78(2), 707–718.
- Naaman, R., & Waldeck, D.H. (2012). Chiral-Induced Spin Selectivity Effect. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 3(16), 2178–2187.

Электрофизиология растений

- Fromm, J., & Lautner, S. (2007). Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 249–257.
- Fabricant, A. et al. (2021). Action potentials induce biomagnetic fields in carnivorous Venus flytrap plants. *Scientific Reports*, 11, 15662.
- Toyota, M. et al. (2018). Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science*, 361(6407), 1112–1115.

Поведение и память растений

- Gagliano, M. et al. (2014). Experience teaches plants to learn faster and forget slower in environments where it matters. *Oecologia*, 175, 63–72.
- Gagliano, M. et al. (2016). Learning by association in plants. *Scientific Reports*, 6, 38427.
- Hedrich, R., & Neher, E. (2018). Venus flytrap: how an excitable, carnivorous plant works. *Trends in Plant Science*, 23(3), 220–234.

Левин

- Levin, M. (2021). Bioelectric signaling: Reprogrammable circuits underlying embryogenesis, regeneration, and cancer. *Cell*, 184(8), 1971–1989.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.02.067>

Энергетика мозга

- Attwell, D., & Laughlin, S.B. (2001). An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 21(10), 1133–1145.

Интринсическая нервная система сердца

- Armour, J.A. (2007). The little brain on the heart. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 74(Suppl 1), S48–S51.
- Berthoud, H.R., & Neuhuber, W.L. (2000). Functional and chemical anatomy of the afferent vagal system. *Autonomic Neuroscience*, 85(1–3), 1–17.
- Kim, J.H. et al. (2022). Geomagnetic disturbances reduce heart rate variability in the Normative Aging Study. *Science of The Total Environment*. PMID 35644403.
- McCraty, R. et al. (2017). Synchronization of Human Autonomic Nervous System Rhythms with Geomagnetic Activity in Human Subjects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 770. PMC5551208.

Поляризационная микроскопия и двулучепреломление биологических полимеров

- Inoué, S. (1953). Polarization optical studies of the mitotic spindle. *Chromosoma*, 5(1), 487–500.
- Oldenbourg, R., & Mei, G. (1995). New polarized light microscope with precision universal compensator. *Journal of Microscopy*, 180(2), 140–147.

Микротрубочки у растений — структура и гомология

- Hussey, P.J., & Hawkins, T.J. (2001). Plant microtubule-associated proteins: the HEAT is on. *Trends in Plant Science*, 6(6), 239–241.

- Morejohn, L.C. (1991). The molecular pharmacology of plant tubulin and microtubules. *The Cytoskeletal Basis of Plant Growth and Form*, 29–43.
- Lloyd, C., & Chan, J. (2004). Microtubules and the shape of plants to come. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 5(1), 13–22.

Предшествующие работы по Orch OR у растений

- Barlow, P.W. (2015). The natural history of consciousness, and the question of whether plants are conscious, in relation to the Hameroff-Penrose quantum-physical 'Orch OR' theory of universal consciousness. *Communicative & Integrative Biology*. PMC4594572

Новые экспериментальные подтверждения Orch OR (важны для актуальности)

- Craddock et al. (2017). Anesthetic Alterations of Collective Terahertz Oscillations in Tubulin Correlate with Clinical Potency. *Scientific Reports*.
<https://www.nature.com/articles/s41598-017-09992-7>
 - Pal et al. (2024). Microtubule-Stabilizer Epothilone B Delays Anesthetic-Induced Unconsciousness in Rats. *eNeuro*.
<https://www.eneuro.org/content/11/8/eneuro.0291-24.2024>
 - Babcock, N.S., Montes-Cabrera, G., Oberhofer, K.E., Chergui, M., Celardo, G.L., & Kurian, P. (2024). Ultraviolet superradiance from mega-networks of tryptophan in biological architectures. *The Journal of Physical Chemistry B*, 128(17), 4035–4046.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.3c07936>
-

English Version

Quantum Mechanisms of Plant Irritability: The Bose–Penrose Hypothesis of Orch OR in Microtubules as a Universal Biological Substrate

Type: Theoretical hypothesis / Review with original concept **Author:** Pavel Aleksandrov
Author position: Independent Researcher **ORCID:** 0009-0001-1921-2033

*"Not what you think, is Nature: Not cast, not lifeless face — In her there is a soul,
there is freedom, In her there is love, there is language" — F.I. Tyutchev, 1836*

Abstract

Volatile anesthetics reversibly suppress plant irritability — action potentials, habituation, and stimulus summation — with the same dose-dependent profile as in animal nervous tissue. This observation, documented by Jagadish Chandra Bose (1913–1926) and independently confirmed in peer-reviewed journals [Yokawa et al., 2018], lacks a mechanistic explanation: plants possess neither neurons nor synapses, the classical targets of anesthetic action.

We propose the **Bose–Penrose hypothesis**: volatile anesthetics suppress plant irritability through the same molecular mechanism as animal anesthesia — binding to hydrophobic pockets within tubulin, disrupting quantum superpositions of tubulin conformational states as proposed by Orchestrated Objective Reduction (Orch OR; Penrose & Hameroff, 1996). Three independent lines of evidence support this claim. First, plant tubulin shares ~75% sequence homology with animal tubulin, and hydrophobic pocket geometry is evolutionarily conserved, as demonstrated by identical efficacy of colchicine, taxol, and nocodazole across plant and animal microtubules [Morejohn, 1991]. Second, the molecular mechanism of anesthetic action is specific to protein hydrophobic pockets, not lipid membranes: non-immobilizer compounds with high lipophilicity lack anesthetic activity; stereoisomers differ in potency; purified luciferase is inhibited by volatile anesthetics in the complete absence of membranes [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Third, volatile anesthetics alter collective THz oscillations of tubulin proportionally to clinical potency [Craddock et al., 2017], and the microtubule stabilizer epothilone B delays anesthetic-induced unconsciousness in rats [Pal et al., 2024].

Furthermore, Bose's five phenomena constitute a **four-level memory hierarchy** spanning milliseconds to weeks — temporal summation (ms), Venus flytrap two-touch rule (~30 s), fatigue (min–h), and habituation (28 days [Gagliano et al., 2014]) — implemented entirely

without neurons. The Venus flytrap two-touch rule is analyzed as a distributed quorum-detection problem: spatial summation across physically separated trigger hairs without a central integrating node. These observations make plants a uniquely clean model for studying the physical substrate of biological memory, precisely because the absence of neurons eliminates competing mechanisms.

Critically, plant cells offer a methodological advantage unavailable in neurons: they lack GABA-A receptors, NMDA receptors, opioid receptors, and other classical neuronal anesthetic targets. Tubulin is thus virtually the exclusive molecular candidate for anesthetic action in plant cells — making plants a *cleaner* model system for testing the tubulin mechanism than neurons themselves.

The hypothesis implies that neurons are not the unique substrate of quantum computation, but an evolutionary specialization of a mechanism universal to all eukaryotes. We formulate six testable predictions spanning molecular, biophysical, behavioral, and optical levels of analysis: (1) affinity of volatile anesthetics for plant tubulin predicts potency of irritability suppression; (2) *Arabidopsis thaliana* CRISPR mutants with modified hydrophobic pockets show altered anesthetic sensitivity; (3) plant microtubules exhibit a scale-invariant resonance hierarchy analogous to that described for neural microtubules; (4) microtubule-disrupting agents impair habituation in *Mimosa pudica*; (5) terpenoid microtubule stabilizers enhance, rather than suppress, plant irritability; (6) volatile anesthetics alter birefringence of microtubule networks in living plant cells, detectable by polarization microscopy without fluorescent labeling. None of these experiments have been performed. Their results — in either direction — will advance understanding of the molecular basis of eukaryotic irritability and may reframe the question of where, in the continuous spectrum of living matter, quantum computation begins.

Keywords

Orch OR, plant irritability, microtubules, anesthetics, tubulin, quantum biology, Bose, Hameroff, Penrose, proto-consciousness, eukaryotic irritability, quantum coherence

1. Introduction

Volatile anesthetics — chloroform, diethyl ether, xenon — reversibly suppress plant irritability. This observation, documented in detail by Jagadish Chandra Bose in a series of works from 1913–1926 [Bose, 1913; 1926], remains without a mechanistic explanation to this day. The paradox is as follows: traditionally, the targets of volatile anesthetics were

sought in nervous tissue — ion channels, synaptic receptors, neuronal membranes. Plants possess neither neurons nor synapses. Nevertheless, chloroform reversibly suppresses action potentials, habituation, and stimulus summation in plant tissues — with the same dose-dependent profile as in animal nervous tissue [Bose, 1926]. Upon removal of the anesthetic, all responses are restored.

The key to this paradox lies in the history of anesthesiology itself. In 1899–1901, Meyer and Overton independently established that the potency of a volatile anesthetic is proportional to its lipid solubility (the oil/water partition coefficient) — and this relationship holds across six orders of magnitude for chemically dissimilar molecules [Meyer, 1899; Overton, 1901]. For nearly a century, this correlation was explained by "fluidization" of the lipid bilayer of cell membranes. However, a series of experiments refuted the lipid theory: non-immobilizers — molecules with high lipophilicity but lacking anesthetic activity [Koblin et al., 1994] — showed that membrane solubility alone is insufficient. Anesthetic stereoisomers differ in potency despite identical lipophilicity — pointing to a chiral, i.e., protein target. The decisive evidence was Franks and Lieb's demonstration that volatile anesthetics inhibit purified luciferase in the complete absence of membranes [Franks & Lieb, 1982; 1994]: the target is a protein.

Quantum effects in warm, wet biological environments are no longer theoretical exotica: they have been experimentally confirmed in photosynthetic antenna complexes [Fleming et al., 2007] and in avian magnetoreception [Ritz et al., 2000]. The present work examines a different mechanism — quantum superpositions in the hydrophobic pockets of tubulin — with its own independent evidence base.

Hameroff proposed a specific class of protein targets: hydrophobic pockets within tubulin — the principal structural protein of microtubules [Hameroff, 1998]. According to the theory of Orchestrated Objective Reduction (Orch OR), developed jointly with Penrose [Penrose & Hameroff, 1996; Hameroff & Penrose, 2014], it is within these pockets that quantum superpositions of tubulin conformational states are realized. Their collapse via objective reduction (OR) underlies conscious experience. Volatile anesthetics, binding to the pockets via van der Waals interactions, suppress quantum superpositions and thereby "switch off" consciousness. This model reinterprets the Meyer–Overton correlation: it reflects not membrane solubility, but affinity for the hydrophobic pockets of proteins, principally tubulin. Direct confirmation comes from the work of Craddock et al. [Craddock et al., 2017], who showed that volatile anesthetics alter collective THz oscillations of tubulin in proportion to their clinical potency, and from the work of Pal et al. [Pal et al., 2024], in which the microtubule stabilizer epothilone B delayed loss of consciousness in rats under isoflurane.

Microtubules are not a neuron-specific structure. They are present in all eukaryotic cells and are assembled from the same α/β -tubulin. Plant tubulin is approximately 75% identical

to animal tubulin at the amino acid sequence level; the geometry of the hydrophobic pockets is evolutionarily conserved, as evidenced by the identical action of colchicine, taxol, and nocodazole on the microtubules of both plants and animals.

This gives rise to the question addressed in the present paper: if volatile anesthetics suppress plant irritability through the same molecular mechanism — binding to the hydrophobic pockets of tubulin — what is being suppressed in plant cells? If the target is the same as in animals, it is logical to suppose that the suppressed process is also the same: quantum computation in microtubules via the Orch OR mechanism.

The present work formulates this hypothesis — the Bose–Penrose hypothesis — in rigorous form, traces its chain of evidence from Bose's observations through the Meyer–Overton correlation to the structural biology of tubulin, and proposes specific testable predictions. If the hypothesis is correct, neurons represent not the unique substrate of consciousness, but its evolutionary specialization: a centralized and greatly amplified form of a mechanism that is inherent to all eukaryotic cells.

2. Historical Context: Bose's Work

Jagadish Chandra Bose (1858–1937) was an Indian physicist and biophysicist, one of the pioneers in the study of electrical signals in living tissues. Working in Calcutta in the late 19th and early 20th centuries, he systematically demonstrated that the responses of plants to external stimuli are amenable to precise quantitative measurement and exhibit features traditionally ascribed exclusively to the nervous tissue of animals. To this end, Bose constructed the crescograph — an instrument with mechanical amplification up to 10,000-fold, allowing the registration of microscopic tissue movements — as well as an electrical probe for recording propagating potentials [Bose, 1902; 1913].

In the course of systematic experiments, Bose described five phenomena, each of which individually admitted explanation from classical physiology, but which together formed a picture that extended beyond its bounds.

Action potential. Upon mechanical, thermal, or chemical stimulation, a wave of electrical potential propagates through plant tissues. In the shape of its curve — rise, peak, repolarization — it reproduces the action potential of animal nervous tissue [Bose, 1913]. The conduction velocity varies between species, but the all-or-nothing principle holds: a subthreshold stimulus does not produce a propagating signal. Modern electrophysiology has fully confirmed the existence of propagating potentials in plants [Fromm & Lautner, 2007]; in 2021, the biomagnetic signals of the Venus flytrap were recorded with an atomic magnetometer — the instrument detected a magnetic analog of the neural action potential

[Fabricant et al., 2021].

Habituation. With repeated weak stimulation, the amplitude of the response gradually decreases and may fall to zero; after a period of rest, sensitivity is restored [Bose, 1926]. This phenomenon — the simplest form of learning — was considered the prerogative of the nervous system. Gagliano et al. reproduced it in *Mimosa pudica* in a rigorously controlled modern experiment: plants learned to ignore repeated harmless drops and retained the acquired response after 28 days [Gagliano et al., 2014]. In the same series of works, associative learning in plants was demonstrated [Gagliano et al., 2016] — a phenomenon previously linked exclusively to the nervous system.

Summation. Two subthreshold stimuli, separated by a short interval, can elicit a suprathreshold response [Bose, 1913] — a phenomenon analogous to temporal summation at synapses. Modern studies of Ca^{2+} signaling have shown that the plant possesses a system of rapid calcium waves capable of integrating multiple signals in space and time [Toyota et al., 2018] — a biochemical substrate explaining the summation Bose observed without invoking synaptic structures.

Fatigue. After a series of strong stimuli, the plant ceases to respond and recovers reactivity only after a period of rest [Bose, 1926]. Bose interpreted this as depletion of a physiological resource, analogous to the refractory period of a nerve fiber. However, this interpretation is incomplete. In the neuron, fatigue has a known molecular address: depletion of neurotransmitter stores, intracellular Ca^{2+} accumulation, shift of ionic gradients. In the plant there is no specialized apparatus for "accumulating fatigue" — and yet fatigue is present. This means that something changes its state under repeated stimulation and retains that change throughout the recovery period. The molecular substrate of this state has not been established. Crucially, fatigue in Bose is not passive resource depletion: it is a regulatory phenomenon. The system does not "break" under overload; it enters a protected state of reduced excitability and then actively returns to its original baseline. In other words, it has a setpoint of normal excitability and a mechanism for returning to it — which takes fatigue beyond simple physiology and makes it a *psycho-like response* in the strict sense: not merely a reaction, but self-regulation.

Reversible suppression by anesthetics. This is the central observation of the present work. Bose showed that chloroform and other volatile anesthetics completely and reversibly suppress all of the above responses [Bose, 1926]. After removal of the anesthetic, the plant recovers its reactivity — sometimes passing through a brief phase of heightened excitability similar to that observed in animals. Bose compared these data with the action of the same agents on nervous tissue and noted qualitative agreement. Nearly a century later, this observation was reproduced by an independent group: Yokawa et al. showed that diethyl ether blocks action potentials in the Venus flytrap and suppresses

movements of diverse plant organs; after aeration, all responses recovered within 15 minutes [Yokawa et al., 2018]. The same group subsequently published a systematic review extending this conclusion to the entire sensory and adaptive system of plants [Yokawa & Baluška, 2021]. Accordingly, Bose's key observation has been confirmed in peer-reviewed journals of Oxford University Press and Springer by independent methods 92 years after its original publication.

The five phenomena share a common structural signature. Plant responses to stimuli are: *adaptive* (the response changes depending on the history of stimulation), *integrative* (multiple input signals are combined into a single output), and *reversible* (the system restores its initial state after cessation of the stimulus). It is precisely this architecture — not the specific biochemical substrate — that unites plant responses with those of animal nervous tissue. To designate this class of responses, we propose the term **psycho-like responses** (*psycho-like responses*): adaptive, integrative, and reversible reactions to external stimuli, structurally homologous to psychophysiological processes. The term is neutral with respect to the question of consciousness: it describes the *architecture* of the response, not its inner nature, and is applicable regardless of whether a given process is accompanied by subjective experience.

Examined more closely, the five psycho-like responses are distributed along a continuous spectrum of temporal scales of information storage. Summation operates at the sub-second scale: the trace of the first stimulus must be retained until the arrival of the second — ultra-short-term integration, an analog of working memory. An intermediate scale — seconds — is documented in the Venus flytrap: the trap closes only upon two touches of different sensitive hairs within ~30 seconds [Hedrich & Neher, 2018]; the trace of the first touch must be present in the tissue at the moment of the second — this is short-term state memory. Fatigue unfolds on the scale of minutes and hours: the system retains the overload state until recovery is complete. Habituation operates on the scale of weeks: the plant remembers the safety of a specific stimulus after 28 days without a single repetition [Gagliano et al., 2014] — long-term memory by any functional criterion. Thus, Bose's five phenomena form a **four-level memory hierarchy**: from fractions of a second to a month. The substrate of each level has not been established.

From the perspective of information systems theory, this hierarchy acquires unexpected clarity. Summation — processor registers: exist only at the moment of computation. Venus flytrap — L2/L3 cache: tens of seconds, volatile. Fatigue — RAM: retains the state of the working session, reset on "reboot." Habituation — persistent storage: survives 28 "sleep cycles." The analogy immediately exposes the central question: **how does this biological computer function?** What is the information carrier, where is the program stored, and what is the mechanism of its operation? In a computer, each level has a known substrate — silicon, charges, magnetic domains. In the plant, the substrate of each level has not

been established. Most likely these are state patterns distributed across the tubulin network — analogously to how a file is encoded in a distributed pattern of physical states of a storage medium, and does not "reside" in one place.

The Venus flytrap's two-touch rule poses a separate systems question about **spatial summation**. Two signals arrive from physically separated hairs — there is no locus of integration. For the threshold to be reached collectively, each cell of the tissue must retain the trace of the first touch until the second arrives. In distributed systems terms: this is consensus without a master node, quorum detection without a coordinator. Notably, the two-touch rule also functions as a filter: a raindrop (a chaotic, single stimulus) will not trigger the trap. The system does not merely sum — it classifies the signal by pattern. This is a cognitive function, implemented in tissue without a single neuron.

One candidate for the role of memory substrate may be the spin states of tubulin itself. Tubulin is a chiral protein, and its helical structure should exhibit the CISS effect (Chiral Induced Spin Selectivity) — selective transmission of electrons by spin orientation, confirmed for DNA and proteins [Naaman & Waldeck, 2012]. The tryptophan residues of the hydrophobic pocket — the very ones to which anesthetics bind — form aromatic radical pairs with spin-dependent recombination. The combinatorial space of spin states in a tubulin network is astronomically large — sufficient to encode any volume of biological information without additional molecular structures. This is an open hypothesis, lacking direct experimental verification in plant tubulin; it is discussed in more detail in a separate publication.

The cognitive architecture of plants — a four-level memory hierarchy, spatial integration without a central node, and the question of the substrate of information — extends beyond the scope of the present work and constitutes the subject of a separate theoretical publication [Alexandrov, in preparation: "Hierarchy of Cognitive Functions in Plants"].

The significance of Bose's experimental programme is not limited to the plant kingdom. In his 1902 monograph "Response in the Living and Non-Living," Bose documented analogous phenomena in inorganic matter: metals — tin, iron, nickel — under repeated electrical stimulation exhibited fatigue (reduction in response amplitude), recovery after a period of rest, and — most strikingly — suppression by chloroform, the same agent that suppressed plant responses [Bose, 1902]. Bose drew an explicit conclusion: the boundary between the living and non-living is gradual, not ontological; psycho-like responses as an architectural pattern do not belong exclusively to living matter. This conclusion, radical in 1902, acquires a new dimension in the context of the present hypothesis: if the substrate of plant irritability is quantum processes in tubulin, then analogous responses of metals indicate either a different substrate of the same architecture, or a broader distribution of quantum processes in matter — a question that remains open.

The totality of this evidence raises one question with increasing urgency: what common molecular substrate underlies the phenomenology observed by Bose and confirmed by modern science? The answer to that question is the subject of the present work.

3. Orch OR Theory and the Role of Anesthetics

A microtubule is a hollow cylinder ~25 nm in diameter, whose walls are formed by spirally packed α/β -tubulin dimers. Each dimer consists of two subunits (~55 kDa each), bound non-covalently. Within each subunit there are hydrophobic pockets — cavities lined with nonpolar amino acid residues (leucine, isoleucine, phenylalanine, tryptophan) and isolated from the aqueous surroundings. The low dielectric constant within the pocket and the minimal thermal noise from water create conditions fundamentally different from the cytoplasmic environment [Hameroff, 1998].

The theory of Orchestrated Objective Reduction (Orch OR), developed by Penrose and Hameroff [Penrose & Hameroff, 1996; Hameroff & Penrose, 2014], proposes that the conformational states of the tubulin dimer — two possible spatial configurations of the β -subunit — can exist in quantum superposition. Each dimer thus functions as a qubit, and the entire microtubule, containing thousands of dimers in superposition, implements massively parallel quantum computation.

The collapse of the superposition in Orch OR does not occur as a result of decoherence from the thermal environment (as in standard quantum mechanics of open systems), but rather through objective reduction (OR) — a physical process arising from the instability of the superposition of quantum-gravitational differences in spacetime. The OR criterion is given by the Dirac–Penrose relation: the superposition collapses when its gravitational self-energy E reaches the threshold $E \cdot \tau \approx \hbar$, where τ is the lifetime of the superposition and $\hbar$ is the reduced Planck constant [Penrose, 1994]. This is precisely the distinguishing feature of Orch OR from purely computational models of consciousness: the collapse is neither random (as in standard quantum measurement) nor algorithmic — it is determined by the geometry of spacetime, which ensures, according to Penrose, the non-computable character of conscious experience.

The role of volatile anesthetics in this scheme is specific and well-defined. Anesthetics — substances with high affinity for hydrophobic environments — penetrate tubulin pockets and bind there via van der Waals interactions. These interactions are weak enough not to alter the primary structure of the protein, but strong enough to disrupt the subtle quantum dynamics within the pocket: the electronic configurations of the aromatic residues (primarily tryptophan) that support quantum coherence are suppressed by the presence of a foreign molecule [Hameroff, 1998]. The result is the impossibility of a stable

superposition; OR does not reach its threshold; quantum computation is interrupted. According to Orch OR, this is the loss of consciousness.

Quantum effects in isolated π -systems are not a speculative assumption: they have been directly measured in structurally related molecules. Fullerene C_{60} and carbon nanotubes — systems with a closed or extended π -electron shell and complete absence of polar groups — demonstrate quantum interference under conditions where most organic molecules decohere instantaneously [Arndt et al., 1999]. The reason is the same as that ensuring superposition stability in the hydrophobic pocket of tubulin: isolation of the π -electron system from the fluctuating dipolar environment of water. The hydrophobic pocket of tubulin reproduces this principle by biological means: the nonpolar cavity with aromatic residues (Trp, Phe, Tyr) is structurally analogous to a fullerene cage, and the microtubule itself — a hollow cylinder ~25 nm in diameter — is geometrically comparable to a multi-walled nanotube. This is not a coincidental resemblance: apparently both classes of structures independently realize the optimal geometry for retaining quantum coherence under thermal noise conditions.

This model has received direct experimental confirmation. Craddock et al. [Craddock et al., 2017] showed that volatile anesthetics alter the collective THz oscillations of tubulin, with the magnitude of the effect linearly correlated with the clinical potency of the anesthetic — reproducing the Meyer–Overton correlation, but now at the protein level rather than the membrane level. Pal et al. [Pal et al., 2024] demonstrated that administration of epothilone B — a microtubule stabilizer — delays loss of consciousness in rats under isoflurane: the more stable the microtubules, the more difficult it is for the anesthetic to interrupt quantum computation.

Deserving special attention is the resonance hierarchy described by Bandyopadhyay et al. on the basis of broadband dielectric measurements of microtubules [Sahu et al., 2013a; 2013b]. The authors found a scale-invariant series of resonant frequencies spanning several orders of magnitude: THz (tubulin dimer) → GHz (oligomer) → MHz–kHz (microtubule) → Hz (microtubule bundle). This hierarchy is consistent with the Orch OR model, in which quantum superpositions of individual dimers are "orchestrated" through coherent oscillations of the entire structure. Notably, anesthetics suppress oscillations precisely within this frequency range — consistent with Craddock's data and Hameroff's mechanism.

The totality of the foregoing forms a coherent molecular chain: hydrophobic pocket of tubulin → quantum superposition of conformational states → OR collapse → conscious experience; volatile anesthetic → suppression of superposition in the pocket → absence of OR → loss of consciousness. In the next section we examine how transferable this mechanism is to plant cells.

One essential qualification is required here. The term "orchestrated" points to an unsolved problem within the theory itself: what mechanism coordinates quantum superpositions in thousands of tubulin dimers into a biologically coherent result? From the standpoint of control theory, any coordination loop presupposes a setpoint — a reference against which the current state of the system is compared. Without a setpoint, coordination is impossible: the system does not know what to aim for. Remarkably, the same problem arises with respect to kinesin — the motor protein that walks along microtubules with remarkable processivity and delivers cargo to specific addresses. The Brownian ratchet explains the mechanics of the step, but not the addressing: neither reproducing kinesin artificially with comparable characteristics nor explaining the source of the targeting information has yet proved possible. It is crucial that the setpoint cannot be static: a **"living setpoint"** (*living setpoint*) — one capable of autonomously revising its own criteria without recourse to an external agent and without a pre-specified rule of revision — is a necessary condition for the viability of any orchestrated system. A control loop containing such a setpoint we call **living feedback** (*living feedback*): a loop in which the reference state is neither fixed externally nor computed internally, but is continuously generated by the system from a source lying beyond its computational level. This condition is not met by any computational architecture, including quantum computers, which remain Turing machines in the class of problems they can solve. Moreover, since the living setpoint itself requires a setpoint, there arises a hierarchy of control levels ("setpoint of setpoints"), which is the direct formal analog of "orchestration" in Penrose's sense. The requirement for an external setpoint is not arbitrary — it follows from Gödel's incompleteness theorem: no sufficiently rich formal system can prove its own consistency by means of the same level of description. Applied to biology: no mechanism can fully specify the meaning of its operations from its own substrate — the setpoint must come from outside. In IT terms, this is the equivalent of the impossibility of writing a program that verifies itself without recourse to an external verifier; the regress always terminates in a living agent standing outside the system. This conclusion has been independently reached in Russian cognitive neuroscience: Tatiana Chernigovskaya, Director of the Institute for Cognitive Studies at Saint Petersburg State University, argues explicitly from Gödel's incompleteness theorems that intuition and understanding cannot be reduced to a set of rules [Chernigovskaya, 2013] — a convergence of perspectives across mathematical physics (Penrose) and empirical neuroscience that elevates this claim from a speculative proposal to a cross-disciplinary position. The detailed justification of these concepts — their formal necessity from Gödel's theorems and Polanyi's thesis about the tacit character of knowledge — constitutes the subject of a separate publication to which the present work refers the reader [Alexandrov, in press: "Orchestration of Biological Processes: The Necessity of Feedback and the Problem of the Supra-Quantum Setpoint"]. We note that this question is not resolved by recourse to Penrose's Platonic world either: a static world of mathematical structures itself requires a source of activity — something that is not yet another structure, but pure

generative activity from which all structures flow. Whether the living setpoint is immanent to the Platonic world or points to a level surpassing it is an open theoretical question that lies beyond the scope of the present work.

4. Microtubules in Plants

Microtubules are not a structure specialized for nervous tissue. They are present in all eukaryotic cells — from yeast to neurons — and perform universal functions: organization of cell division, maintenance of cell shape, intracellular transport. This fact is fundamental to the present hypothesis: if Orch OR is realized in the microtubules of neurons, the question of its presence in plant cells reduces to the question of the conservation of the substrate.

Tubulin homology. Plant α/β -tubulin is approximately 75% identical to animal tubulin at the amino acid sequence level [Hussey & Hawkins, 2001]. This is a high degree of similarity for two branches of eukaryotes that diverged approximately 1.5 billion years ago. The peripheral regions of the molecule, responsible for interactions with regulatory proteins, differ — reflecting the specifics of the plant cell. However, the internal structural domains, including the hydrophobic pockets, are evolutionarily conserved.

Conservation of hydrophobic pockets — the key fact. The hydrophobic pockets of tubulin are, according to Hameroff, the site of quantum superposition and the target of volatile anesthetics. Their conservation in plants is demonstrated functionally: colchicine, taxol, and nocodazole — substances binding to hydrophobic sites on tubulin — disrupt or stabilize microtubules of both plants and animals with comparable efficacy [Morejohn, 1991]. A molecule binding to the pocket does not distinguish the species of organism — the geometry of the pocket is the same. This is the direct molecular evidence for conservation of the structure critical to the hypothesis.

Functions of microtubules in plants. In the plant cell, microtubules perform at least three functionally significant roles. First, they form the mitotic spindle during cell division — structurally and functionally identical to the animal spindle. Second, cortical microtubules determine the orientation of cellulose microfibril deposition in the cell wall, specifying cell shape and direction of growth [Lloyd & Chan, 2004]. Third, microtubules participate in signal transduction: in cells responding to mechanical and chemical stimuli, reorganization of the cortical MT array occurs within seconds of stimulation.

Venus flytrap as a model system. *Dionaea muscipula* is the most studied example of fast integrative response in plants. Trap closure is triggered by two touches of trigger hairs within ~30 seconds; a single touch does not elicit a response — the plant "counts" stimuli.

This temporal summation effect is implemented without neurons. Microtubules participate in mechanical signal transduction from trigger hairs to motor cells [Hedrich & Neher, 2018], and the biomagnetic signals accompanying the trap's action potential were recorded with an atomic magnetometer [Fabricant et al., 2021] — making Venus flytrap a unique experimental model for testing quantum effects in plant MTs.

Plasmodesmata as intercellular quantum channels. Unlike neurons, plant cells are connected by plasmodesmata — cytoplasmic channels ~30–60 nm in diameter, penetrating cell walls and providing direct continuity between the cytoplasm of adjacent cells. Through plasmodesmata, ionic currents, small molecules, and signaling proteins propagate. In the context of Orch OR, plasmodesmata represent a potential substrate for the propagation of quantum-correlated states between cells — a functional analog of synaptic connection, realized by fundamentally different structural means. This allows the proposal of a resonance hierarchy for the plant cell analogous to the Bandyopadhyay hierarchy for neurons:

tubulin (THz) → dimer (GHz) → cell MT (MHz-kHz) → symplast through plasmodesmata (Hz)

Thus, the plant cell possesses all structural components necessary for realization of the Orch OR mechanism: α/β -tubulin with conserved hydrophobic pockets, functionally active microtubules participating in signaling, and intercellular channels capable of serving as substrate for the propagation of correlated quantum states. The next question is: does this mechanism operate?

Behavior without neurons: a broader context. Plants are not the only eukaryotes exhibiting coordinated behavior in the absence of a nervous system. The cilia of *Paramecium* and the flagella of spermatozoa — axonemes of nine microtubule doublets — produce coordinated wave-like movements without any central control. Amoebae perform directed chemotaxis via pseudopodia organized by the cytoskeleton. The most striking example is *Physarum polycephalum*, a unicellular slime mold: it solves mazes, reproduces the topology of transport networks, and demonstrates anticipation of periodic stimuli — all without a single neuron. The common denominator in all cases is microtubules. This observation is material to the hypothesis: if the MT substrate of behavior is universal among eukaryotes, the plant case ceases to be an exception and becomes part of a general pattern. A detailed analysis of these systems in the context of the orchestration problem is presented in a separate work.

5. The Central Hypothesis: Orch OR in Plants

Structure of the argument

The four preceding sections establish the evidence base from which the hypothesis follows with logical necessity. Let us formulate its structure explicitly.

Premise 1. Volatile anesthetics reversibly suppress plant irritability with a dose-dependent profile identical to their action on animal nervous tissue. This fact is established by Bose (1926) and independently confirmed in peer-reviewed journals 92 years later [Yokawa et al., 2018; Yokawa & Baluška, 2021].

Premise 2. The molecular mechanism of action of volatile anesthetics is specific binding to the hydrophobic pockets of tubulin. It is within these pockets that, according to Orch OR, quantum superpositions of conformational states are realized. Specificity to the protein pocket is not an assumption, but an experimentally established fact: non-immobilizers lack anesthetic activity despite high lipophilicity; stereoisomers differ in potency; purified luciferase is inhibited in the absence of membranes [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Direct measurements have shown that volatile anesthetics alter THz oscillations of tubulin in proportion to clinical potency [Craddock et al., 2017], and the microtubule stabilizer epothilone B delays loss of consciousness in rats [Pal et al., 2024].

Premise 3. The hydrophobic pockets of tubulin are evolutionarily conserved and structurally identical in plants and animals. Direct functional evidence: colchicine, taxol, and nocodazole — ligands of these pockets — with equal efficacy disrupt or stabilize microtubules of both taxa [Morejohn, 1991]. The molecule does not distinguish the species of organism; the geometry of the pocket is one.

Conclusion. If volatile anesthetics suppress plant irritability through binding to the same pockets of plant tubulin, they suppress the same class of processes as in neurons. Since in neurons this class of processes is, according to Orch OR, quantum superpositions of tubulin conformational states — it follows by logical necessity that the same superpositions are realized in the microtubules of plant cells and serve as the substrate of the irritability observed by Bose.

Formal statement

The Bose–Penrose Hypothesis. Quantum superpositions of the conformational states of tubulin, realized in the hydrophobic pockets of α/β -tubulin dimers, constitute the universal molecular substrate of irritability for all eukaryotic cells. Volatile anesthetics suppress plant irritability by the same mechanism as animal consciousness: through binding to the conserved hydrophobic pockets of tubulin and disruption of the quantum dynamics within them. The neuron is not the unique substrate of quantum computation, but its evolutionary specialization.

Resonance hierarchy in the plant cell

Bandyopadhyay et al. described for neuronal microtubules a scale-invariant resonance frequency hierarchy spanning several orders of magnitude: THz oscillations of the tubulin dimer → GHz oscillations of the oligomer → MHz–kHz oscillations of the microtubule → Hz oscillations of the bundle [Sahu et al., 2013a; 2013b]. This hierarchy is consistent with the Orch OR model, in which quantum superpositions of individual dimers are orchestrated through coherent oscillations of the entire structure.

In the plant cell, this hierarchy has a functional analog with one fundamental structural addition. Plasmodesmata — cytoplasmic channels ~30–60 nm in diameter penetrating cell walls — create a cytoplasmic continuum between cells (the symplast). Through the symplast, ionic currents, Ca^{2+} waves, and signaling molecules propagate, providing electrical and biochemical connectivity at the tissue level. In the context of Orch OR, plasmodesmata represent a potential substrate for propagation of quantum-correlated states between cells — a functional analog of synaptic connection realized by fundamentally different structural means. This permits the resonance hierarchy for the plant cell to be described as:

tubulin dimer	(THz)
plant cell MT	(MHz–kHz)
symplast via plasmodesmata	(Hz)

Notably, the diameter of the plasmodesma (~30–60 nm) is comparable to the diameter of the microtubule itself (~25 nm): the channel structure theoretically permits mechanical contact between cytoskeletal elements of adjacent cells, which opens the possibility of direct transmission of mechanical oscillations through the cell wall.

Neuron as evolutionary specialization

Acceptance of the hypothesis changes the conceptual status of the neuron. In standard neurobiology, the neuron is regarded as a cell specifically designed for information processing and the formation of consciousness — a unique structure separating "thinking" systems from "non-thinking" ones. The Bose–Penrose hypothesis implies otherwise: the neuron is an *evolutionary specialization* of the mechanism of quantum computation in microtubules, inherent to all eukaryotes.

In this perspective, the evolution of the nervous system can be described as a series of architectural decisions built upon a common computational substrate. *The base level* — quantum superpositions in MTs, coordinated through Ca^{2+} waves and intercellular contacts — is realized in all eukaryotes: unicellular organisms (*Paramecium* — coordinated

ciliary movement through MT axonemes without central control; *Physarum polycephalum* — maze solving and stimulus anticipation without a single neuron), plants, fungi. *The first specialization* — cells with high MT density and rapid signaling, proto-neurons (the diffuse nerve net of *Hydra*). *Centralization* — the neuron with an axon: directed signal transmission over long distances; the synapse — an amplified and modulated intercellular connection instead of the symplast (*C. elegans*: 302 neurons, fully mapped connectome). *Integration* — neural networks and the brain: a scaled, greatly amplified architecture on the same molecular substrate.

An analogy from the theory of computing systems: the transistor is the basic computational element that precedes the processor. The processor does not invent a new principle — it centralizes, scales, and architecturally optimizes what the transistor was doing individually. The existence of a CPU does not make the individual transistor "not a genuine" computational element. The existence of a brain does not make the plant cell a system without quantum computation.

Connection to bioelectric morphogenesis

Michael Levin has shown that bioelectric patterns — gradients of transmembrane potential maintained through gap junctions — direct morphogenesis, regeneration, and oncogenesis independently of the genetic program [Levin, 2021]. The bioelectric pattern functions as a higher-level control layer — a setpoint for the molecular processes below.

Gap junctions in animals and plasmodesmata in plants are functionally similar: both create electrically coupled cellular ensembles [Levin, 2021; Fromm & Lautner, 2007]. By analogy with the bioelectric patterns described by Levin for gap junctions, one may hypothesize that the plant symplast is capable of performing an analogous coordinating role — however, this remains a hypothesis without direct experimental verification. The Bose–Penrose hypothesis and Levin's program then describe different levels of the same architecture: Orch OR — the quantum computational level; the bioelectric pattern — the higher classical control level. The question of how these levels interact, and how many levels of hierarchy actually exist, remains open and constitutes one of the central problems of quantum biology.

6. Testable Predictions

The scientific value of a theoretical hypothesis is determined not only by logical rigor, but also by its ability to generate specific, falsifiable predictions. Below are formulated six predictions, each following directly from the Bose–Penrose hypothesis and admitting verification by experimental methods that exist in contemporary biophysics and molecular

biology. Each prediction is accompanied by a description of the expected result if the hypothesis is true and the result that falsifies it.

Prediction 1. The affinity of volatile anesthetics for plant tubulin predicts their potency in suppressing irritability.

The hypothesis asserts that anesthetics suppress plant irritability precisely through binding to the hydrophobic pockets of plant tubulin. If so, the strength of suppression should correlate with the molecule's affinity for this site — rather than with its lipophilicity per se. This distinguishes the prediction from the trivial Meyer–Overton correlation: it requires correlation with the protein site, not with membrane solubility.

Protocol: isolate tubulin from plant cells (standard sources — spinach leaves or *Arabidopsis thaliana*); measure binding constants of a series of volatile anesthetics by isothermal titration calorimetry (ITC) or surface plasmon resonance (SPR). In parallel, determine EC_{50} values of the same anesthetics for irritability suppression in *Mimosa pudica* and Venus flytrap in vivo. Compare the affinity and potency rankings. The use of tubulin from different plant species is methodologically justified by high sequence conservation (~75% homology between plant species); the ideal control would be a parallel series with tubulin isolated directly from *Mimosa pudica*, but this requires substantially greater biomass.

Confirmation of hypothesis: ranking anesthetics by affinity to plant tubulin coincides with ranking by potency of irritability suppression. *Falsification:* the correlation is higher with lipophilicity than with tubulin affinity — this would indicate a membrane rather than tubulin mechanism.

Prediction 2. *Arabidopsis thaliana* mutants with altered tubulin hydrophobic pockets exhibit altered anesthetic sensitivity.

This is the most direct test of the mechanism. *Arabidopsis* encodes several isoforms of α - and β -tubulin (TUA1–6, TUB1–9); targeted substitution of amino acid residues forming the hydrophobic pocket by CRISPR/Cas9 methods allows the creation of plants with a geometrically modified anesthetic binding site.

Protocol: introduce point mutations in β -tubulin residues corresponding to the proposed anesthetic binding site per Hameroff (primarily hydrophobic residues in the region of the β -subunit). Compare three parameters between mutant and wild-type lines: (1) threshold anesthetic concentration suppressing the action potential; (2) baseline irritability in the absence of anesthetic; (3) speed of recovery from anesthesia.

Confirmation of hypothesis: mutants with a reduced pocket require higher anesthetic concentrations (decreased sensitivity); mutants with an enlarged pocket — lower concentrations (increased sensitivity). Baseline irritability changes synchronously — since the same pocket is the substrate of quantum superpositions. *Falsification:* the mutation changes anesthetic sensitivity but does not affect baseline irritability — this would indicate that the pocket is only a binding site, but not the functional substrate of irritability.

Prediction 3. Plant cell microtubules at 300 K exhibit a scale-invariant dielectric resonance hierarchy analogous to that of neuronal MTs.

Bandyopadhyay et al. [Sahu et al., 2013a; 2013b] described for neuronal MTs a resonance frequency hierarchy spanning several orders of magnitude: THz → GHz → MHz–kHz → Hz. If plant tubulin realizes the same quantum superpositions, the same hierarchy should be present in plant MTs.

Protocol: isolate MTs from *Arabidopsis* or spinach cells; apply broadband dielectric spectroscopy (Bandyopadhyay's method) or THz spectroscopy. Compare spectra with neuronal MTs and with controls after colchicine depolymerization. Additionally: repeat the measurement in the presence of volatile anesthetics — the prediction is that anesthetics will suppress the same frequency ranges as in neuronal MTs (replication of Craddock et al., 2017, but with plant tubulin).

Confirmation of hypothesis: the spectrum of plant MTs reproduces the scale-invariant hierarchy; anesthetics suppress it in proportion to clinical potency. *Falsification:* the hierarchy is absent, or qualitatively different from the neuronal one — this would indicate a difference in quantum dynamics despite structural similarity of tubulin.

Prediction 4. The substrate of habituation in *Mimosa pudica* is linked to the state of microtubules.

Gagliano et al. documented that *Mimosa pudica* learns to ignore repeated harmless drops and retains this response for 28 days [Gagliano et al., 2014]. The molecular substrate of this "memory" has not been established. From the Bose–Penrose hypothesis follows a strict prediction regarding the **formation** of habituation: since anesthetics suppress MT dynamics in real time, they should interfere with the writing of a new memory trace directly during training. This is a direct consequence of the hypothesis, independently falsifiable. The question of **retention** of already-formed memory is not a strict prediction — the substrate of the long-term trace may not coincide with the substrate of OR collapse, and its nature constitutes a separate scientific problem. The results of an experiment on memory retention, however, form a branch point for further research: MT-dependence of retention would indicate a single substrate for encoding and storage; its absence — separation of mechanisms and the need to search for the substrate of long-term memory beyond MT

dynamics.

Protocol: divide plants into groups: (a) training under normal conditions; (b) training against a background of sub-anesthetic concentrations of nocodazole or colchicine (MT depolymerization); (c) training against a background of taxol (MT stabilization). Distinguish two phases: the agent acts **during** training (test of the strict prediction) and the agent is introduced **after** training (exploratory question about retention). Test: speed of habituation acquisition; retention after 28 days; recovery of irritability after treatment cessation.

Confirmation of hypothesis: MT agents acting during training impair habituation formation.

Falsification: MT agents do not affect habituation formation even when acting during training — indicating an MT-independent mechanism for memory writing and calling into question the MT nature of the irritability substrate in *Mimosa*.

Prediction 5. Terpenoid microtubule stabilizers enhance, rather than suppress, plant irritability.

The hypothesis predicts a structural symmetry: if anesthetics suppress quantum dynamics in tubulin pockets and thereby reduce irritability, then molecules with the same affinity for the pocket but stabilizing MTs should produce the opposite effect. Taxol (a diterpene from *Taxus brevifolia*) stabilizes MTs in animals and delays loss of consciousness under anesthetic [Pal et al., 2024] — evidence of the principle in animals. Volatile monoterpenes (β -caryophyllene, 1,8-cineole, α -pinene), components of essential oils, are biochemically related to taxol and interact with high affinity with hydrophobic environments.

Protocol: measure baseline irritability of *Mimosa pudica* and Venus flytrap (threshold and speed of response to a standard mechanical stimulus); expose plants for 15–30 minutes to vapors of volatile monoterpenes (β -caryophyllene, 1,8-cineole) at sub-anesthetic concentrations; repeat the measurement. In parallel: diethyl ether exposure as a negative control. Additionally: test whether terpene pretreatment creates resistance to subsequent anesthetic suppression.

Confirmation of hypothesis: terpenes lower the irritability threshold and/or accelerate the response; terpene pretreatment increases the concentration of anesthetic required for suppression. *Falsification:* terpenes do not differ in effect from anesthetics — meaning affinity for the hydrophobic environment predicts only suppression, not enhancement.

Prediction 6. Volatile anesthetics alter birefringence of microtubule networks in plant cells.

Ordered arrays of tubulin are optically anisotropic: their birefringence is measurable by polarization microscopy methods and serves as a direct indicator of the structural order of

the MT network [Inoué, 1953; Oldenbourg & Mei, 1995]. The observed birefringence signal contains two independent contributions: (1) *form birefringence* — a consequence of the periodic geometry of the tube itself, the dominant contribution; (2) *intrinsic birefringence* — the molecular polarizability anisotropy of tubulin dimers, determined primarily by the orientation of aromatic residues (Phe, Trp, Tyr) in the hydrophobic pocket. The Bose–Penrose hypothesis admits two mechanisms for changing the total signal upon anesthetic action.

Direct pathway: the anesthetic occupies the hydrophobic pocket → reorients the aromatic residues → changes the polarizability tensor of the dimer → slightly alters intrinsic birefringence. This is a subtle effect: the form contribution dominates, and this pathway may fall below the detection threshold of standard methods.

Indirect pathway: the anesthetic shifts the conformational equilibrium of GTP-/GDP-tubulin → alters the kinetics of MT polymerization and depolymerization → the density and orientational order of the MT network in the cell changes → form birefringence changes as an integral signal. This pathway is likely more sensitive for detection; indirect confirmation comes from the change in collective THz oscillations of tubulin under anesthetics demonstrated by Craddock et al., which reflects a change in protein dynamics [Craddock et al., 2017].

Protocol: polarization microscopy of living plant cells (root meristem of *Allium cepa* or *Arabidopsis*) monitoring MT bundle birefringence before and after exposure to a volatile anesthetic (diethyl ether, isoflurane). Depolymerization control: colchicine completely eliminates the signal, confirming its MT specificity. Reversibility control: anesthetic washout. Concentration series: from sub-narcotic to narcotic.

Confirmation of hypothesis: anesthetics alter birefringence of MT networks dose-dependently, with correlation by clinical potency; signal recovers after washout.

Falsification: birefringence does not change against a background of behavioral anesthesia — indicating that anesthetics act through a mechanism not affecting the structural order of MTs (e.g., through membrane channels or the actin cytoskeleton).

Enhancement through diurnal MT reorganization. Cortical MT arrays in plant cells physically change orientation over the course of a day: transposition from transverse to longitudinal orientation and back is governed by light signals and coupled to the diurnal growth cycle [Lloyd & Chan, 2004]. This shift in orientation is directly reflected in the cell's birefringence signal and forms a measurable, reproducible diurnal pattern. An anesthetic disrupting MT dynamics should disturb this pattern — rather than merely slightly changing the absolute value of Δn at a single time point. Comparison of "normal diurnal birefringence cycle vs. cycle against anesthetic background" is experimentally substantially more

persuasive than a "before and after" snapshot: the control is built into the very nature of the phenomenon. Important caveat: the MT reorganization described is *diurnal* (light-driven); its strictly circadian nature (persistence under constant conditions) requires separate verification.

Practical significance: polarization microscopy does not require fluorescent labels and permits observation of MT dynamics under native conditions. Prediction 6 is inferior to Prediction 3 in physical directness (form contribution masks the molecular one), but substantially more advantageous in experimental accessibility: a polarization microscope is standard equipment in any biological laboratory.

The totality of the six predictions spans four levels of analysis: molecular (predictions 1–2), biophysical (predictions 3, 6), behavioral (predictions 4–5). Prediction 6 is fundamentally distinct from the others: it is direct optical probing of the conformational state of tubulin without labeling. The Bose–Penrose hypothesis is falsifiable at each level independently.

7. Discussion

7.1 Limitations

The hypothesis rests on an unfinished theory. Orch OR is a competing hypothesis with a growing experimental base, but without scientific consensus. Decoherence in the warm, wet cellular environment remains a serious physical objection: critics [Tegmark, 2000] estimate the lifetime of quantum superpositions in neurons at $\sim 10^{-13}$ seconds — many orders of magnitude less than required by Penrose's OR threshold. Proponents of Orch OR counter that the hydrophobic pocket is isolated from the thermal noise of water and represents a fundamentally different environment from the open cytoplasm; direct measurements [Babcock et al., 2024] confirmed quantum collective states in MTs at room temperature. Nevertheless, the debate is not closed, and the present hypothesis inherits this uncertainty.

No direct data on quantum effects in plant MTs exists. Bandyopadhyay's measurements were performed on neuronal MTs; Craddock's experiments used animal tubulin. No work has measured the THz spectrum of plant tubulin in the presence of anesthetics. Prediction 3 of the present work directly addresses this gap, but until its experimental verification this link in the chain of evidence remains conjectural.

Classical ion chemistry provides competing explanations. All five Bose phenomena — action potential, habituation, summation, fatigue, anesthetic suppression — admit explanation through Ca^{2+} signaling, ion channels, and receptor desensitization without

invoking quantum assumptions. Volatile anesthetics inhibit in plants not only tubulin, but also plasma membrane ion channels. The present work does not assert that classical mechanisms are wrong — it asserts that quantum processes in tubulin constitute an additional level of organization that explains the specificity of the Meyer–Overton correlation at the molecular level.

The "memory" of Mimosa admits alternative explanations. Habituation in *Mimosa pudica* may be caused by changes in turgor pressure in motor cells, reversible modification of Ca^{2+} channels, or receptor adaptation — without invoking an MT substrate. Prediction 4 is designed precisely to experimentally distinguish between these possibilities.

OR orchestration without neurons remains an open question. Orch OR in neurons presupposes "orchestration" of quantum superpositions by neuronal processes — Ca^{2+} waves, synaptic patterns, network oscillations. In the plant cell these mechanisms are absent. The present hypothesis proposes that analogous roles are performed by Ca^{2+} waves in the symplast and mechanical connectivity through plasmodesmata (Section 5) — however, no direct experimental data confirming intercellular coordination of OR events in plants exists. This is the most vulnerable link in the logical chain: the mechanism of anesthetic suppression is justified; the mechanism of orchestration is not. Predictions 3 and 6 indirectly test this question through measurement of coherent oscillations of plant tubulin, but direct verification requires a separate investigation.

7.2 Responses to objections

Draguhn et al. [2020] argue that anesthetic action on plants reflects general cellular toxicity, not a specific mechanism related to consciousness. However, this position reproduces the lipid-membrane theory of anesthesia, refuted as far back as the 1980s–1990s: non-immobilizers with high lipophilicity lack anesthetic activity; stereoisomers differ in potency despite identical lipophilicity; and purified luciferase is inhibited by volatile anesthetics in the complete absence of membranes [Franks & Lieb, 1982; 1994; Koblin et al., 1994]. Specificity to the hydrophobic pockets of proteins, primarily tubulin, is not an assumption but an experimentally confirmed fact [Craddock et al., 2017; Pal et al., 2024]. Notably, these data were obtained after the publication of Draguhn et al. and directly address their objection.

It is appropriate here to point out the methodological advantage that, paradoxically, makes plants a *more* suitable model system than neurons. In neural tissue, volatile anesthetics act on multiple molecular targets simultaneously: GABA-A receptors, NMDA receptors, opioid receptors, voltage-gated sodium channels — all contribute to the total anesthetic effect and make it difficult to isolate the specific contribution of tubulin. In the plant cell, these targets are entirely absent: no neuronal receptors, no synaptic structures, no opioid system.

Tubulin becomes virtually the only candidate satisfying the Meyer–Overton criterion — a correlation that holds across seven orders of magnitude for chemically dissimilar molecules. Glutamate-like receptors of plants (GLR) and mechanosensitive channels (MSL) are also inhibited by a number of anesthetics [Fromm & Lautner, 2007; Toyota et al., 2018], but their inhibition does not follow Meyer–Overton-regularity and does not explain the specificity of stereoisomers and non-immobilizers. The protein hydrophobic pocket of tubulin is the only identified structure whose geometry reproduces the physicochemical basis of this correlation. This means that Bose's observation — complete and reversible suppression of irritability by volatile anesthetics — in plants testifies to a target with greater unambiguity than analogous data in neurons. The absence of a nervous system, traditionally perceived as a weakness of the argument, is its experimental strength: plants represent a cleaner model for testing the tubulin mechanism of anesthesia than neurons.

A broader objection is as follows: even if anesthetics act through tubulin, this does not prove that the process they suppress in plants is related to consciousness. The Bose–Penrose hypothesis accepts this objection as legitimate and responds to it structurally: the present work does not assert that plants are conscious in the human sense. It asserts that the molecular substrate underlying plant irritability is identical to the substrate proposed by Orch OR theory for animal consciousness. The question of what in plants corresponds to this substrate functionally is open and constitutes the subject of the predictions in Section 6.

7.3 The architectural argument: psycho-like responses require more than mechanism

The foregoing points to a deeper limitation of mechanistic explanations. Ion channels, Ca^{2+} waves, and receptor desensitization describe the molecular mechanisms of individual responses — but do not explain their collective architecture. A psycho-like response is adaptive: the system changes its response depending on the history of stimuli, i.e., it maintains a dynamic setpoint — a reference state against which the current input is compared. It is integrative: multiple signals are combined according to some criterion, i.e., the setpoint weighs inputs against a goal. It is reversible: the system returns to its initial state — i.e., the setpoint is restored after perturbation.

As noted in Section 3 with respect to the orchestration problem, any coordination loop with an adaptive setpoint requires a *living setpoint* — one capable of autonomously revising its own criteria without recourse to an external agent. This condition is met by no computational architecture: any Turing machine, including quantum computers, operates within the bounds of pre-specified rules and is incapable of revising them from within. The living setpoint presupposes a source lying outside the computational level of the system.

It is precisely this that Orch OR provides: OR collapse is determined not by an algorithm, but by the geometry of spacetime — the structure of the Platonic world in Penrose's terms. This is the non-computable source of the guiding principle, logically required by the architecture of psycho-like responses. Thus, the very fact of the existence of psycho-like responses — before the question of anesthetics and tubulin — points to a level of organization surpassing mechanistic description. This is not direct proof of proto-consciousness, but an architectural requirement that proto-consciousness satisfies, whereas a closed mechanism in isolation does not. Classical ion chemistry describes *how* the response is realized; the question of *why* it is organized in just this way — adaptively, integratively, and reversibly — remains beyond its scope.

Machine learning provides a third, operational confirmation of the same necessity — and the most accessible to the contemporary reader. The basic algorithm of neural network learning ($\theta \rightarrow \theta - \eta \cdot \nabla L(\theta)$) is mathematically impossible without an externally specified loss function L : without a goal there is no gradient, there is no learning. The hierarchy of setpoints in any ML system — parameters, hyperparameters, architecture, task selection — never closes within the system; at the apex there is always a living agent. This is the operational realization of what Gödel proved formally and Polanyi epistemologically: a system cannot specify the meaning of its operations from its own descriptive level. It is essential that feedback in any learning scheme — pre-training on texts, RLHF, constitutional AI — loops through human consciousness or its crystallized products (books, scientific papers, expert evaluations). No scheme closes the loop without consciousness on the outside. This is precisely what makes the gap between ML and consciousness not a question of scale or complexity, but an ontological one: OR collapse offers the only mathematically coherent way to close this regress — through the geometry of the Platonic world, self-sufficient by definition.

7.4 Implications

The neuron — not beyond, but within the continuum. If the hypothesis is correct, the neuron is not nature's invention, but its architectural solution built upon an already-existing mechanism. This changes the framing of the central question of neuroscience: not "how do neurons generate consciousness," but "how does neural architecture amplify and centralize a process universal to all eukaryotes." In this perspective, an example lying directly within the animal organism deserves attention. The intrinsic nervous system of the heart contains approximately 40,000 neurons forming their own ganglionic networks and capable of independent information processing [Armour, 2007]. An anatomical asymmetry is telling, one rarely mentioned even in specialized literature: the number of nerve fibers running from the heart to the brain substantially exceeds the number running in the opposite direction — approximately 80% of vagal nerve fibers are afferent [Berthoud & Neuhuber, 2000]. The heart does not receive commands from above — it continuously

sends them upward. Within the framework of Penrose–Hameroff theory, neurons of the cardiac ganglia with the same microtubules and hydrophobic tubulin pockets are full candidates for participation in quantum computation; the question of what precisely is transmitted through these 80% of ascending fibers acquires an unexpected dimension in this context.

Notably, the intrinsic nervous system of the heart exhibits sensitivity to the geomagnetic environment: heart rate variability correlates with the level of geomagnetic activity — this effect has been documented in both prospective cohort studies [Kim et al., 2022; PMID 35644403] and physiological experiments with continuous HRV monitoring [McCraty et al., 2017]. If this effect is realized through a radical pair mechanism — spin-dependent quantum states documented in avian magnetoreception [Ritz et al., 2000] — then cardiac neurons become a site where OR collapse in tubulin is modulated by global cosmic processes.

The boundary of consciousness in nature. Standard neurobiology draws an ontological boundary: neurons present — consciousness possible; neurons absent — consciousness excluded. The Bose–Penrose hypothesis implies otherwise: this boundary is quantitative, not qualitative. Consciousness — or what Penrose calls proto-consciousness — is not invented by animals and is certainly not a privilege of humans. It is present wherever OR collapse in tubulin reaches its threshold — i.e., in all eukaryotic cells. Neural systems did not introduce a fundamentally new process; they created a scaled, centralized, and semantically enriched architecture for it.

Notably, Bose himself pointed even further. In "Response in the Living and Non-Living" (1902), he documented psycho-like responses in inorganic matter — metals exhibiting fatigue, recovery, and suppression by chloroform. If the boundary between living and non-living is gradual, as Bose insisted, then the question of the locus of proto-consciousness in this continuum remains open beyond biology. The present work does not claim to resolve it; it merely notes that the evidential logic developed here for plants reproduces the intuition that Bose discovered also in non-living matter one hundred and twenty years ago.

Molecular complexity as a predictor. Accepting the hypothesis, we inevitably encounter the question: why specifically tubulin? One possible answer lies in the structural analogy with molecular systems for which quantum stability has been confirmed experimentally. Fullerenes and carbon nanotubes — "pure" π -electron systems — lie in a continuous molecular series from simple aromatic rings to complex protein cavities. Tubulin apparently occupies a special place in this series: its hydrophobic pocket appears to realize the same physical idea of isolation as the fullerene cage — but in a biological context that, if Orch OR is correct, permits orchestration of quantum states across the entire MT network. If so,

molecular complexity and π -electron density may serve as indirect predictors of quantum "availability" for OR — and the search for quantum-computational substrates in biology should begin precisely with hydrophobic, aromatically dense cavities.

Energy efficiency as indirect evidence. The human brain consumes ~20 W in solving tasks whose approximate computational reproduction requires data centers drawing megawatts [Attwell & Laughlin, 2001]. This gap is not explained solely by architectural advantages (absence of the von Neumann bottleneck, sparse coding). If Orch OR is correct, quantum coherence of MTs provides "free" coordination through entanglement and potentially operates below the classical Landauer limit, since OR collapse is determined by Planck-scale geometry rather than thermodynamics. The paradoxical energy efficiency of the brain may be an indirect empirical signature of quantum computation in microtubules.

The mathematical structure of OR collapse. Remarkably, the mathematical structure underlying Orch OR is reproduced independently at several levels of description. The conformational states of the tubulin dimer — transitions between two spatial configurations of the β -subunit — are rotations in conformational space, described by the group SU(2). The same group describes electron spin in quantum mechanics, the CISS effect in chiral tubulin [Naaman & Waldeck, 2012], and spinors in Penrose's OR criterion [Penrose & Rindler, 1984]. One mathematical structure appears at the level of electron spin, molecular conformational transition, and Planck-scale spacetime geometry. Unit quaternions, forming the group SU(2), have no analog in Euclidean or Minkowski space — they are Platonic in the strict sense: discovered by Hamilton, not invented. If Orch OR is correct, biological computation is realized in an algebra that exists only in the Platonic world. This observation is preliminary in character and requires separate mathematical analysis; it is presented here as an indication of the depth of structural unity that the Bose–Penrose hypothesis opens beyond biology.

Practical implications. If tubulin is the universal substrate of irritability in eukaryotes, anesthesiology acquires a new analytical framework: the efficacy of volatile anesthetics is determined not by their lipophilicity per se, but by affinity for the evolutionarily conserved hydrophobic pocket of a specific protein. This opens the possibility of rational design of anesthetics with specified specificity for tubulin isoforms of different tissues. For plant biology, the implication is that anesthetic sensitivity may serve as an indirect marker of quantum dynamics in MTs and, consequently, as an indicator of the physiological state of plant tissue — an application extending beyond fundamental science.

8. Conclusion

Bose documented a fact that neurobiology preferred not to notice for a century: volatile anesthetics suppress plant irritability with the same dose-dependent profile as animal consciousness — reversibly, specifically, reproducibly. The present work offers a mechanistic explanation for this fact, resting on three independent lines of evidence: the mechanism of anesthetic action (specificity to hydrophobic pockets of tubulin, not to membrane lipids — establishing the molecular target), the evolutionary conservation of this target (the structure of the tubulin pocket is preserved in plants and animals, as proven by the identical action of colchicine and taxol on both taxa), and Orch OR theory (OR collapse in tubulin pockets as the substrate of conscious experience). From the intersection of these three lines, the Bose–Penrose hypothesis follows: quantum superpositions of tubulin conformational states are the universal molecular substrate of irritability for all eukaryotes, and the neuron is an evolutionary specialization of this universal mechanism — not its unique bearer.

The significance of the hypothesis, if confirmed, extends beyond plant biology. The boundary of consciousness in nature — a question that standard neurobiology resolved anatomically (neurons present — consciousness present) — turns out to be a quantitative question, not an ontological one. Proto-consciousness, in Penrose's terminology, is not invented by biological evolution: it is present wherever OR collapse in tubulin reaches its threshold — i.e., in all eukaryotic cells. Neural systems did not introduce a fundamentally new process: they created a scaled, centralized, and semantically enriched architecture for it. The architectural analysis of psycho-like responses — adaptive, integrative, and reversible reactions found in plants, unicellular organisms, and, per Bose's observations, even in non-living matter — indicates that their organization requires living feedback: a loop with a setpoint whose source lies beyond the computational level of the system. This structural requirement, independent of the experimental verification of Orch OR, is itself an argument against reducing irritability to a purely mechanistic description. It receives operational support from three independent sources: formally — Gödel's theorem (a closed formal system cannot derive its own complete description); epistemologically — Polanyi's argument about tacit knowledge; operationally — the basic algorithm of machine learning: any gradient descent ($\theta \rightarrow \theta - \eta \cdot \nabla L(\theta)$) is mathematically impossible without an externally specified loss function L , and no implemented learning system closes the feedback loop without consciousness on the outside. Additional indirect evidence for the quantum nature of the computation is the paradoxical energy efficiency of the brain: ~20 W against megawatts of data centers for comparable computational task complexity [Attwell & Laughlin, 2001]. This gap is not explained solely by architectural advantages — if Orch OR is correct, OR collapse is determined by Planck-scale geometry rather than thermodynamics, and potentially operates below the classical Landauer limit.

The present work is theoretical: it formulates a hypothesis, traces its evidential logic, and proposes specific experimental tests. Six predictions span four levels of analysis —

molecular, biophysical, behavioral, and optical — and are independently falsifiable. The most immediately accessible: measurement of anesthetic affinity for plant tubulin by isothermal calorimetry; exposure of *Mimosa pudica* and Venus flytrap to volatile monoterpene vapors; polarization microscopy of plant cells in the presence of anesthetics (standard equipment, native conditions, no labels). The most decisive: THz spectroscopy of plant microtubules in the presence of anesthetics; *Arabidopsis* mutants with altered tubulin hydrophobic pockets. None of these experiments has been performed. Their results — in either direction — will advance understanding of the molecular basis of eukaryotic irritability and clarify where, in the continuous spectrum of living matter, the boundary of quantum computation lies.

Bose wrote in 1902 that the boundary between the living and the non-living is gradual. He did not have the instruments to identify the molecular substrate of this gradient. A hundred and twenty years later, the structural biology of tubulin, quantum biophysics, and Orch OR theory provide exactly such instruments. The Bose–Penrose hypothesis is an attempt to use them to test an intuition that proved more accurate than its time.

References

Bose

- Bose, J.C. (1926). *The Nervous Mechanism of Plants*. Longmans, Green and Co.
- Bose, J.C. (1902). *Response in the Living and Non-Living*. Longmans.
- Bose, J.C. (1913). *Researches on Irritability of Plants*. Longmans.

Orch OR and anesthetics

- Penrose, R. (1994). *Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness*. Oxford University Press.
- Penrose, R., & Rindler, W. (1984). *Spinors and Space-Time, Volume 1: Two-Spinor Calculus and Relativistic Fields*. Cambridge University Press.
- Hameroff, S., & Penrose, R. (1996). Orchestrated reduction of quantum coherence in brain microtubules. *Mathematics and Computers in Simulation*, 40, 453–480.
- Hameroff, S., & Penrose, R. (2014). Consciousness in the universe: A review of the 'Orch OR' theory. *Physics of Life Reviews*, 11(1), 39–78.
- Hameroff, S. (1998). Anesthesia, consciousness and hydrophobic pockets. *Toxicology Letters*, 100–101, 31–39.
- Tegmark, M. (2000). Importance of quantum decoherence in brain processes. *Physical Review E*, 61(4), 4194–4206.
- Draguhn, A., Mallatt, J.M., & Robinson, D.G. (2020). Anesthetics and plants: no pain, no brain, and therefore no consciousness. *Protoplasma*, 258(2), 239–248.

Meyer–Overton and anesthetic mechanism

- Meyer, H. (1899). Zur Theorie der Alkoholnarkose. *Archiv für experimentelle Pathologie und Pharmakologie*, 42, 109–118.
- Overton, C.E. (1901). *Studien über die Narkose*. Verlag von Gustav Fischer.
- Franks, N.P., & Lieb, W.R. (1982). Molecular mechanisms of general anaesthesia. *Nature*, 300(5892), 487–493.
- Franks, N.P., & Lieb, W.R. (1994). Molecular and cellular mechanisms of general anaesthesia. *Nature*, 367(6464), 607–614.
- Koblin, D.D., Chortkoff, B.S., Laster, M.J., Eger, E.I., Halsey, M.J., & Ionescu, P. (1994). Polyhalogenated and perfluorinated compounds that disobey the Meyer-Overton hypothesis: implications for theories of narcosis. *Anesthesia & Analgesia*, 79(6), 1043–1048.

Microtubules and tubulin

- Sahu, S., Ghosh, S., Ghosh, B., Aswani, K., Hirata, K., Fujita, D., & Bandyopadhyay, A. (2013a). Atomic water channel controlling remarkable properties of a single brain microtubule: Correlating single protein to its supramolecular assembly. *Biosensors and Bioelectronics*, 47, 141–148. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.02.050>
- Sahu, S., Ghosh, S., Hirata, K., Fujita, D., & Bandyopadhyay, A. (2013b). Multi-level memory-switching properties of a single brain microtubule. *Applied Physics Letters*, 102(12), 123701. <https://doi.org/10.1063/1.4793995>
- Nogales, E., Wolf, S.G., & Downing, K.H. (1998). Structure of the $\alpha\beta$ tubulin dimer. *Nature*, 391, 199–203.

Anesthetics and plants — contemporary confirmations

- Yokawa, K. et al. (2018). Anaesthetics stop diverse plant organ movements, affect endocytic vesicle recycling and ROS homeostasis, and block action potentials in Venus flytraps. *Annals of Botany*, 122(5), 747–756. PMC6215046.
- Yokawa, K., & Baluška, F. (2021). Anaesthetics and plants: from sensory systems to cognition-based adaptive behaviour. *Protoplasma*, 258, 753–761. PMC7907011.

Quantum effects in biology

- Arndt, M., Nairz, O., Vos-Andreae, J., Keller, C., van der Zouw, G., & Zeilinger, A. (1999). Wave–particle duality of C_{60} molecules. *Nature*, 401(6754), 680–682.
- Engel, G.S., Calhoun, T.R., Read, E.L., Ahn, T.K., Mančal, T., Cheng, Y.C., Blankenship, R.E., & Fleming, G.R. (2007). Evidence for wavelike energy transfer through quantum coherence in photosynthetic systems. *Nature*, 446(7137), 782–786.

- Ritz, T., Adem, S., & Schulten, K. (2000). A model for photoreceptor-based magnetoreception in birds. *Biophysical Journal*, 78(2), 707–718.
- Naaman, R., & Waldeck, D.H. (2012). Chiral-Induced Spin Selectivity Effect. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 3(16), 2178–2187.

Plant electrophysiology

- Fromm, J., & Lautner, S. (2007). Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant, Cell & Environment*, 30(3), 249–257.
- Fabricant, A. et al. (2021). Action potentials induce biomagnetic fields in carnivorous Venus flytrap plants. *Scientific Reports*, 11, 15662.
- Toyota, M. et al. (2018). Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science*, 361(6407), 1112–1115.

Plant behavior and memory

- Gagliano, M. et al. (2014). Experience teaches plants to learn faster and forget slower in environments where it matters. *Oecologia*, 175, 63–72.
- Gagliano, M. et al. (2016). Learning by association in plants. *Scientific Reports*, 6, 38427.
- Hedrich, R., & Neher, E. (2018). Venus flytrap: how an excitable, carnivorous plant works. *Trends in Plant Science*, 23(3), 220–234.

Bioelectric morphogenesis

- Levin, M. (2021). Bioelectric signaling: Reprogrammable circuits underlying embryogenesis, regeneration, and cancer. *Cell*, 184(8), 1971–1989.
<https://doi.org/10.1016/j.cell.2021.02.067>

Russian cognitive neuroscience

- Chernigovskaya, T.V. (2013). *Cheshire Smile of Schrödinger's Cat: Language and Consciousness*. AST. [In Russian]

Brain energetics

- Attwell, D., & Laughlin, S.B. (2001). An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. *Journal of Cerebral Blood Flow & Metabolism*, 21(10), 1133–1145.

Intrinsic cardiac nervous system

- Armour, J.A. (2007). The little brain on the heart. *Cleveland Clinic Journal of Medicine*, 74(Suppl 1), S48–S51.
- Berthoud, H.R., & Neuhuber, W.L. (2000). Functional and chemical anatomy of the afferent vagal system. *Autonomic Neuroscience*, 85(1–3), 1–17.

- Kim, J.H. et al. (2022). Geomagnetic disturbances reduce heart rate variability in the Normative Aging Study. *Science of The Total Environment*. PMID 35644403.
- McCraty, R. et al. (2017). Synchronization of Human Autonomic Nervous System Rhythms with Geomagnetic Activity in Human Subjects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 770. PMC5551208.

Polarization microscopy and birefringence

- Inoué, S. (1953). Polarization optical studies of the mitotic spindle. *Chromosoma*, 5(1), 487–500.
- Oldenbourg, R., & Mei, G. (1995). New polarized light microscope with precision universal compensator. *Journal of Microscopy*, 180(2), 140–147.

Plant microtubules — structure and homology

- Hussey, P.J., & Hawkins, T.J. (2001). Plant microtubule-associated proteins: the HEAT is on. *Trends in Plant Science*, 6(6), 239–241.
- Morejohn, L.C. (1991). The molecular pharmacology of plant tubulin and microtubules. *The Cytoskeletal Basis of Plant Growth and Form*, 29–43.
- Lloyd, C., & Chan, J. (2004). Microtubules and the shape of plants to come. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 5(1), 13–22.

Prior work on Orch OR in plants

- Barlow, P.W. (2015). The natural history of consciousness, and the question of whether plants are conscious, in relation to the Hameroff-Penrose quantum-physical 'Orch OR' theory of universal consciousness. *Communicative & Integrative Biology*. PMC4594572.

New experimental confirmations of Orch OR

- Craddock, T.J.A. et al. (2017). Anesthetic Alterations of Collective Terahertz Oscillations in Tubulin Correlate with Clinical Potency. *Scientific Reports*.
<https://www.nature.com/articles/s41598-017-09992-7>
- Pal, D. et al. (2024). Microtubule-Stabilizer Epothilone B Delays Anesthetic-Induced Unconsciousness in Rats. *eNeuro*.
<https://www.eneuro.org/content/11/8/eneuro.0291-24.2024>
- Babcock, N.S., Montes-Cabrera, G., Oberhofer, K.E., Chergui, M., Celardo, G.L., & Kurian, P. (2024). Ultraviolet superradiance from mega-networks of tryptophan in biological architectures. *The Journal of Physical Chemistry B*, 128(17), 4035–4046.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.3c07936>

Novelty — brief statement

Barlow (2015) mentions Orch OR in plants in general terms, but does not use Bose's data, does not analyze the anesthetic mechanism through tubulin, and does not formulate testable predictions. The present work is original in the following respects:

1. Bose's data (1913–1926) as central evidence, not illustration
 2. The Meyer–Overton correlation as the connecting link between Bose and Orch OR
 3. Specific molecular predictions (anesthetic affinity for plant tubulin, *Arabidopsis* mutants)
-