

Граница миров: порог квантово-классического перехода

Аннотация

Предложена пороговая модель объективного коллапса волновой функции. Физический вакуум рассматривается как упругая среда (в смысле модели Сахарова) с жёстко заданным пределом текучести $E_{\max} \approx 2,05 \times 10^{-32}$ Дж. Гравитационная самоэнергия тела EG накапливается в пространстве как энергия упругой деформации вакуума. При достижении равенства $EG = E_{\max}$ упругий режим скачкообразно сменяется пластической диссипацией — когерентность квантовой суперпозиции центра масс разрушается объективно, без привлечения внешнего наблюдателя. Данный фазовый переход интерпретируется как бифуркация Пригожина: точка, в которой обратимая (унитарная) эволюция сменяется необратимой, а время-параметр становится временем-процессом в рамках субстанциональной концепции Левича.

Для плавленого кварца (SiO_2 , плотность $\rho \approx 2200$ кг/м³) в оптических ловушках расчётные критические параметры составляют $M_{\text{crit}} \approx 27,1$ пг, что соответствует критическому диаметру микросферы $D_{\text{crit}} \approx 2,87$ мкм. Модель предсказывает существование «зоны тишины» ($\Gamma_c = 0$ строго ниже порога) и излом производной скорости декогеренции по массе выше порога. Скорость декогеренции в запороговой области описывается выражением:

$$\Gamma_c = \omega_{\text{vac}} \times EG E_{\max} \times (EG E_{\max} - 1),$$

где характеристическая частота вакуума составляет $\omega_{\text{vac}} = E_{\max} / \hbar \approx 194,4$ рад/с.

Основное содержание статьи представляет собой протокол эксперимента по измерению механической добротности $Q_m(M)$ методом затухания свободных колебаний (рингдауна). В качестве экспериментальной платформы используются кварцевые микросферы диаметром 1–10 мкм в оптическом пинцете с лазерным охлаждением. Модель предсказывает резкий излом кривой $Q_m(M)$ строго в окрестности порога $D = 2,87$ мкм: ниже порога добротность ограничена лишь классическими потерями и постоянна ($Q_m \approx 1,0 \times 10$), выше — монотонно падает из-за квантово-пластической диссипации вакуума. Для микросфер диаметром $D = 10$ мкм предсказано падение добротности на ~98%, при этом время рингдауна сокращается с 3,18 с до 0,062 с.

Разработанный протокол позволяет однозначно отделить предсказываемый фундаментальный порог декогеренции от классических тепловых шумов и систематических погрешностей за счёт прецизионного контроля давления остаточного газа и мощности лазерного охлаждения. Пороговая модель предлагает физическое разрешение проблемы измерения и парадокса отложенного выбора: редукция волновой функции определяется массой объекта, а не актом его регистрации. Ниже порога суперпозиция реальна (правота Бора), выше — система ведёт себя классически без наблюдателя (правота Эйнштейна).

Ключевые слова: объективный коллапс; упругая модель вакуума; предел текучести; бифуркация Пригожина; рождение необратимости; критическая масса; декогеренция; плавленый кварц; оптический пинцет; лазерное охлаждение; рингдаун; механическая добротность.

1. Введение

Проблема перехода от квантового к классическому описанию макроскопических объектов традиционно рассматривается в терминах декогеренции, вызванной взаимодействием с окружающей средой. Однако фундаментальный вопрос остаётся открытым: существует ли внутренний, имманентный предел устойчивости квантовой суперпозиции, обусловленный самой структурой пространства-времени и гравитацией?

Существующие к настоящему времени модели объективного коллапса — такие как модель Гирарди — Римини — Вебера (GRW), непрерывный спонтанный коллапс (CSL), а также модели Диоши — Пенроуза (DP) — предсказывают плавную, беспороговую декогеренцию, интенсивность которой монотонно нарастает с увеличением массы объекта. Стоит отметить, что беспараметрическая версия модели Диоши — Пенроуза к сегодняшнему дню уже исключена на основании строгих экспериментальных данных. Общим недостатком указанных подходов является допущение ненулевой скорости квантового коллапса при сколь угодно малых массах тестируемых частиц.

В данной работе предлагается модель принципиально третьего типа — пороговая. Предсказываемая моделью «зона тишины» ($\Gamma_c=0$ строго ниже порога) автоматически снимает противоречия со всеми существующими экспериментальными ограничениями, поскольку абсолютно все высокоточные квантовые эксперименты, проведённые на данный момент, выполнялись с массами, не достигающими критического порога. Экспериментальное подтверждение модели планируется осуществить на доступной лабораторной платформе, использующей макроскопические кварцевые микросферы в оптических ловушках.

Концептуальным фундаментом предлагаемой модели выступает междисциплинарный синтез трёх фундаментальных идей:

Концепция Сахарова: гравитация рассматривается как эмерджентный эффект упругости квантовых флуктуаций вакуума, где вакуум выступает в роли упругой среды с модулем объёмного сжатия $K_{vac}=c^4/(16\pi G)$.

Идея Пригожина: необратимость фундаментальна и рождается через механизм бифуркации — качественный, дискретный скачок системы, а не через плавный эволюционный переход. До точки бифуркации система находится на унитарной «термодинамической ветви» (обратимость), после — переходит на диссипативную ветвь.

Субстанциональная концепция Левича: течение времени интерпретируется как поток субстанции сквозь физическую систему. До тех пор, пока этот поток поглощается системой обратимо, время выполняет роль внешнего математического параметра. В момент начала диссипации субстанции время превращается в процесс — необратимый физический акт.

В рамках этой картины физический порог E_{max} представляет собой точку, где унитарная квантовая эволюция теряет устойчивость, и система совершает фазовый переход на диссипативную ветвь. Ниже порога полностью справедлив подход Бора: суперпозиция абсолютно реальна и стабильна, наблюдатель для

её поддержания не требуется. Выше порога подтверждается позиция Эйнштейна: система становится строго классической без участия внешнего агента, так как масса объекта преодолевает предел текучести вакуума. Разработанная модель не требует модификации аппарата общей теории относительности (метрические возмущения составляют ничтожно малую величину $\varepsilon \sim 10^{-35}$) и не опирается на формальные схемы квантования гравитации — она указывает на конкретный масштаб, на котором квантовый и релятивистский режимы стыкуются через механизм бифуркации.

1.1. Состояние эксперимента и мотивация

Чтобы оценить место предлагаемой модели в экспериментальном ландшафте, полезно рассмотреть всю цепочку масс, на которых к настоящему времени продемонстрирована квантовая когерентность центра масс.

Таблица 1. Экспериментальный ландшафт когерентности центра масс (по состоянию на 2026 г.)

Объект	Масса	Тип эксперимента	Разделение	Год
C ₆₀ (фуллерен)	720 Da ($\approx 10^{-9}$ пг)	Интерферометрия центра масс	~пм	1999
Олигопорфирины	25 000 Da ($\approx 4 \times 10^{-8}$ пг)	Talbot–Lau	~фм	2019
Кластеры Na (~7000 атомов)	170 000 Da ($\approx 3 \times 10^{-7}$ пг)	Talbot–Lau	133 нм	2026
SiO ₂ в ловушке (100–143 нм)	~1–3 фг ($\approx 10^{-3}$ пг)	Основное состояние + делокализация	70 пм	2020 – 2025
Сапфировый кристалл (HBAR)	16 мкг (16 000 пг)	Вибрационная суперпозиция	2×10^{-3} нм	2023

Свободнолетающие молекулы (группа Арндта, Вена) достигли рекорда на кластерах натрия: ~7000 атомов, масса $\approx 3 \times 10^{-7}$ пг, разделение 133 нм. Левитированные наночастицы (группы Delić, Rossi) достигли основного

состояния с делокализацией ~ 70 пм на массах ~ 1 фг ($\approx 10^{-3}$ пг). Сапфировый кристалл в эксперименте ETH (2023) продемонстрировал квантовую суперпозицию на массе 16 мкг — однако это вибрационная (фононная) суперпозиция внутри кристалла, а не пространственная суперпозиция центра масс, и в контексте данной модели не рассматривается как тест СОМ-когерентности.

Между текущим рекордом левитированных частиц ($\sim 10^{-3}$ пг) и предсказываемым порогом (27 пг для плавленого кварца) лежит неисследованный диапазон в четыре порядка по массе. Ни один эксперимент на центр масс в этом интервале не выполнен. Это означает, что модель пока не ограничена ни одним существующим результатом — и одновременно указывает на конкретный участок экспериментальной карты, где порог может быть обнаружен.

2. Теория

2.1. Упругая модель вакуума

А. Д. Сахаров показал, что гравитационное взаимодействие может быть интерпретировано как эмерджентный эффект упругости квантовых флуктуаций вакуума. Модуль объёмной упругости вакуума определяется выражением:

$$K_{vac} = 16\pi G c^4 \approx 2,41 \times 10^{42} \text{ Н}.$$

Эйнштейновские уравнения гравитационного поля в данной интерпретации описывают макроскопический упругий отклик вакуумной среды на присутствие тензора энергии-импульса — аналогично тому, как уравнения классической теории упругости задают деформационный отклик непрерывной среды на внешнюю механическую нагрузку. Суть гравитации, согласно Сахарову, заключается в наличии фундаментальной метрической упругости, эффективно противодействующей искривлению пространства-времени.

Однако в рамках индуцированной гравитации Сахарова вопрос о поведении среды при исчерпании предела упругости не ставился. Из механики сплошных сред известно, что при превышении определённого порога материал переходит за предел текучести: упругая деформация сменяется пластическим течением, а обратимое накопление энергии деформации — её необратимой диссипацией. В данной работе постулируется, что физический вакуум обладает аналогичным критическим порогом. Данное положение вводится как независимый физический постулат и определяет новый масштаб теории — предел текучести вакуума E_{max} .

2.2. Предел текучести E_{max}

На основе фундаментальных мировых констант ($\hbar$, c , G) и космологической постоянной (Λ) конструируются две энергетические величины. Первая — планковский масштаб энергии (инвариант модуля упругости):

$$E_P = G \hbar c^5 \approx 1,96 \times 10^{49} \text{ Дж}.$$

Вторая — плотность энергии вакуума, содержащаяся в элементарном планковском объёме (преднапряжение среды):

$$E_{\Lambda} = \rho_{\text{vac}} \times V_P = (\Lambda \times c^4) / (8 \times \pi \times G) \times l_P^3$$

где $l_P = \sqrt{(\hbar \times G / c^3)}$ — планковская длина, а $\Lambda \approx 1,1 \times 10^{-52} \text{ м}^{-2}$.

Численные значения параметров составляют:

Плотность энергии вакуума: $\rho_{\text{vac}} = (\Lambda \times c^4) / (8 \times \pi \times G) \approx 5,30 \times 10^{-10} \text{ Дж/м}^3$

Планковский объём: $V_P = l_P^3 \approx 4,22 \times 10^{-105} \text{ м}^3$

Энергия преднапряжения: $E_{\Lambda} \approx 2,24 \times 10^{-114} \text{ Дж}$

Данная величина выступает аналогом остаточного напряжения в предварительно напряжённых классических материалах.

Безразмерное отношение

$$\Lambda_P = \rho_P / \rho_{\Lambda} = E_P / E_{\Lambda}$$

естественно интерпретируется как объёмная доля возбуждённых связей вакуума — доля объёма, в которой плотность энергии достигает вакуумного значения. В трёхмерном пространстве объёмная доля переводится в линейную деформацию через кубический корень:

$$\varepsilon_{\text{crit}} = (\Lambda_P)^{1/3} = (E_P / E_{\Lambda})^{1/3}$$

Это соответствие прямо следует из теории эффективной среды (effective medium theory): критическая деформация упругой среды определяется линейной долей дефектов, а не объёмной. Предел текучести достигается, когда линейная доля возбуждённых связей превышает критический уровень.

Критическая энергия

Критическая энергия гравитационной самоэнергии, при которой вакуум переходит из упругого режима в диссипативный, равна:

$$E_{\text{max}} = E_P \times \varepsilon_{\text{crit}} = E_P \times (E_P / E_{\Lambda})^{1/3}$$

Возведение в куб даёт:

$$(E_{\text{max}})^3 = (E_P)^2 \times E_{\Lambda}$$

Численно:

- $E_{\text{max}} = ((E_P)^2 \times E_{\Lambda})^{1/3} \approx 2,05 \times 10^{-32} \text{ Дж}$

Показатель 1/3 не является свободным параметром или эвристической догадкой — он принуждён размерностью пространства. В d-мерном пространстве аналогичный вывод даёт показатель 1/d, и формула принимает вид:

$$(E_{\text{max}})^d = (E_P)^{d-1} \times E_{\Lambda}$$

Тем самым анзац перестаёт быть постулатом: он становится предсказанием, однозначно следующим из упругой модели вакуума в трёх измерениях.

Введённый энергетический порог задаёт характеристические временные и частотные масштабы вакуумной среды:

- Временной масштаб: $\tau_{\text{vac}} = \hbar / E_{\text{max}} \approx 5,14 \text{ мс}$.
- Циклическая частота вакуума: $\omega_{\text{vac}} = E_{\text{max}} / \hbar \approx 194,4 \text{ рад/с}$.
- Линейная частота вакуума: $f_{\text{vac}} = E_{\text{max}} / h \approx 30,9 \text{ Гц}$.

2.3. Бифуркация и рождение необратимости

Подпороговый режим ($EG < E_{\max}$): физический вакуум деформируется строго упруго под воздействием гравитационной нагрузки, создаваемой массой тела. Деформация пространства-времени полностью обратима: при снятии нагрузки метрика возвращается к исходному состоянию. Эволюция волновой функции системы остаётся строго унитарной, диссипативные процессы отсутствуют. Время выступает исключительно в качестве внешнего математического параметра t в уравнении Шрёдингера, стрела времени не выражена. Система находится на стабильной «термодинамической ветви» в терминологии Пригожина.

Точка порога ($EG = E_{\max}$): предел упругости вакуумной среды полностью исчерпан. В системе происходит динамическая бифуркация: исходная унитарная ветвь теряет устойчивость, и система скачкообразно переходит на диссипативную ветвь. Данный переход представляет собой дискретный качественный скачок. В рамках субстанциональной концепции Левича в этой точке начинает диссипировать поток субстанции, вследствие чего время теряет свойства внешнего параметра и превращается в самостоятельный физический процесс — рождается макроскопическая стрела времени.

Запороговый режим ($EG > E_{\max}$): вакуум переходит в режим пластического течения. Когерентность квантовой суперпозиции центра масс разрушается объективно — без привлечения внешнего окружения или акта измерения. Скорость спонтанной декогеренции Γ_c описывается феноменологическим выражением:

$$\Gamma_c = \omega_{\text{vac}} \times EG E_{\max} \times (EG E_{\max} - 1) \text{ при } EG > E_{\max}, \\ \Gamma_c = 0 \text{ при } EG \leq E_{\max}.$$

Величина Γ_c прямо пропорциональна собственной циклической частоте гравитационной самоэнергии ($EG/\hbar$), умноженной на относительное превышение порога текучести. В точке излома ($EG = E_{\max}$) значение $\Gamma_c = 0$, а в глубоко запороговой области ($EG \gg E_{\max}$) асимптотика принимает вид $\Gamma_c \propto EG^2/(\hbar \times E_{\max})$.

Наличие «зоны тишины» ($\Gamma_c = 0$ ниже порога) является главным отличительным признаком данной модели, качественно обособляющим её от беспороговых моделей GRW, CSL и Диоши — Пенроуза. Управляющим параметром бифуркации является гравитационная самоэнергия тела EG , а критической точкой — параметр $E_{\max}$. Поскольку данная бифуркация обусловлена внутренней динамической неустойчивостью, а не флуктуациями теплового шума, применимость стандартной флуктуационно-диссипационной теоремы (ФДТ) в запороговой области остаётся под вопросом.

2.4. Критические параметры для плавленого кварца

Гравитационная самоэнергия однородной сферы массы M и радиуса R определяется как:

$$E_G = (3/5) \times (G \times M^2) / R$$

где $R = D / 2$, а $M = (\pi / 6) \times D^3 \times \rho$. Подставляя эти выражения, получаем:

$$E_G = (\pi^2 / 30) \times G \times \rho^2 \times D^5$$

Приравнивая гравитационную энергию к критической ($E_G = E_{\max}$) и решая уравнение относительно D , получаем критический диаметр:

$$D_{\text{crit}} = ((30 \times E_{\max}) / (\pi^2 \times G \times \rho^2))^{1/5}$$

Для плавленного кварца ($\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$):

$$D_{\text{crit}} \approx 2,87 \text{ мкм}$$

$$M_{\text{crit}} = (\pi / 6) \times (D_{\text{crit}})^3 \times \rho \approx 27,1 \text{ пг}$$

Плотность является единственным материальным параметром, определяющим положение порога. Это позволяет предсказать смещение критического диаметра при смене материала по закону: $D_{\text{crit}} \propto \rho^{(-2/5)}$.

Анзац $(E_{\max})^3 = (E_P)^2 \times E_{\Lambda}$ допускает экспериментальную проверку на двух уровнях:

Уровень 1: Существует ли излом зависимости добротности Q_m от массы при некотором значении M_{crit} ?

Уровень 2: соответствует ли измеренное значение $E_{\max}$ теоретической формуле — иначе говоря, попадает ли M_{crit} в предсказанный диапазон?

Положительный ответ на первом уровне подтверждает сам факт существования порога. Положительный ответ на втором — подтверждает показатель $1/3$ и, тем самым, трёхмерность механизма.

2.5. Чувствительность к выбору анзаца

Предел текучести $E_{\max}$ конструируется из комбинации двух энергетических масштабов: E_P и E_{Λ} . Показатель $1/3$ в анзаце $(E_{\max})^3 = (E_P)^2 \times E_{\Lambda}$ выведен из теории эффективной среды для трёхмерного пространства (раздел 2.2). Альтернативные анзацы приводят к существенно иным значениям $E_{\max}$, и следовательно, к иному положению порога.

Анзац $(E_{\max})^4 = (E_P)^3 \times E_{\Lambda}$ даёт $E_{\max} \approx 3,6 \times 10^{-22} \text{ Дж}$ — примерно на 10 порядков больше номинального значения. При этом D_{crit} для плавленного кварца смещается до $\sim 320 \text{ мкм}$, далеко за пределы экспериментального диапазона: все сферы от 1 до 10 мкм остаются в подпороговой зоне, и эффект не наблюдается.

Анзац $(E_{\max})^2 = E_P \times E_{\Lambda}$ даёт $E_{\max} \approx 6,6 \times 10^{-53} \text{ Дж}$ — примерно на 21 порядок меньше. При этом D_{crit} смещается до $\sim 0,2 \text{ нм}$: все сферы от 1 до 10 мкм оказываются глубоко в запороговой зоне, и катастрофическое падение добротности наблюдается уже при $D = 1 \text{ мкм}$.

Таким образом, экспериментальное сканирование в диапазоне 1–10 мкм обеспечивает решающее различие между анзацами: исходный анзац предсказывает порог внутри диапазона, в то время как оба простых

альтернативных анзаца помещают его заведомо вне диапазона — в ту или иную сторону.

Поскольку $D_{crit} \propto (E_{max})^{1/5}$, сдвиг E_{max} на один порядок смещает порог лишь на ~58%, а на два порядка — на ~150%. Сканирование до $D = 10$ мкм ($M \approx 1152$ пг, $E_G / E_{max} \approx 518$) гарантирует обнаружение порога даже при сдвиге E_{max} на два порядка вверх. Отрицательный результат во всём диапазоне 1–10 мкм сужает верхнюю границу E_{max} более чем на два порядка.

3. Эксперимент

3.1. Идея и обоснование выбора материала

Целью эксперимента является фиксация излома на кривой зависимости механической добротности Qm от массы левитирующей микросферы методом рингдауна (затухания свободных колебаний). В точке порога вакуум переходит из упругого режима в пластический, вызывая избыточное затухание $\Gamma_{c,mesh}$.

В качестве материала для левитации используется плавленный кварц (SiO_2) с плотностью $\rho \approx 2200$ кг/м³. Этот материал требует использования оптического пинцета для захвата и удержания микросфер и исключает необходимость создания сложных криогенных магнитных ловушек. Критическая точка излома для плавленного кварца соответствует параметрам: $D_{crit} \approx 2,87$ мкм и $M_{crit} \approx 27,1$ пг.

3.2. Параметры образцов и калибровочная сетка

Используются монодисперсные сферы из плавленного кварца (SiO_2) с диаметрами от 1 до 10 мкм. Геометрический размер (D) измеряется по SEM-снимкам с погрешностью $\delta D/D \leq 3\%$, масса рассчитывается как $M = (\pi/6)D^3\rho$.

Таблица 2. Калибровочная сетка для плавленного кварца. Параметры: SiO_2 , $\rho = 2200$ кг/м³, оптическая ловушка, частота колебаний $f_0 = 100$ кГц, температура среды $T = 4$ К.

D , мкм	M , пг	E_G / E_{max}	Зона	Qm (4 К)	τ , с (4 К)
1,0	1,15	0,005	Подпороговая	$1,0 \times 10^6$	3,18
2,0	9,22	0,166	Подпороговая	$1,0 \times 10^6$	3,18
2,87	27,2	1,00	≈ Порог	$1,0 \times 10^6$	3,18
5,0	144	16,2	Запороговая	$9,56 \times 10^5$	3,04
7,0	395	87,1	Запороговая	$4,18 \times 10^5$	1,33

D , мкм	M , пг	EG / $E_{\max}$	Зона	Qm (4 К)	τ , с (4 К)
10,0	1152	518	Запороговая	19 700	0,062

3.3. Аппаратный комплекс левитации и считывания

Конфигурация: однолучевой оптический пинцет или двухлучевая встречная ловушка. Лазер с длиной волны $\lambda=1064$ нм, выходная мощность регулируется в диапазоне 10–100 мВт.

Собственная частота механических колебаний сферы в ловушке составляет $f_0 \sim 50\text{--}150$ кГц. Регистрация сигнала осуществляется с помощью балансных фотодиодов, фиксирующих флуктуации прошедшего или рассеянного лазерного излучения (метод интерферометрии заднего фокуса).

3.4. Протокол загрузки и верификации частиц

Подготовка суспензии: навеска порошка SiO_2 диспергируется в изопропиловом спирте. Суспензия разбавляется до концентрации, обеспечивающей нахождение не более 1 частицы на площади 100×100 мкм.

Подложка: суспензия наносится каплей на кремниевый чип. После высыхания чип помещается в рабочую камеру. Топография чипа предварительно картографируется на SEM.

Захват: применяется лазерный импульс оптического пинцета (или пьезовстряхивание подложки под лучом лазера) в форвакууме с последующей откачкой.

Идентификация массы: частота ловушки $f_0 = (1/2\pi)k/M$ зависит от жёсткости ловушки k и массы частицы M . При известной калибровке жёсткости (определяемой по спектральному анализу теплового движения частицы известной массы) измерение f_0 даёт независимую оценку M . Дополнительная верификация массы производится по SEM-снимкам: диаметр измеряется непосредственно, а масса пересчитывается через плотность. Расхождение между двумя методами не должно превышать 5%.

Охлаждение: после захвата и откачки до высокого вакуума ($P \leq 10^{-6}$ мбар) применяется активная обратная связь (feedback cooling) для подавления теплового движения. Целевая температура центра масс — ≤ 4 К (при криогенном окружении) или комнатная температура (при пробных измерениях).

3.5. Стратегия сканирования

Грубый проход: измерение Qm на четырёх-пяти диаметрах (1, 3, 5, 7, 10 мкм). Если на $D=10$ мкм Qm рухнула — порог находится ниже, и проводится уточнение.

Уточнение: измерение в окрестности найденного излома с мелким шагом по диаметру ($\Delta D \sim 0,3$ мкм).

Температурный контроль: та же серия при двух температурах (4 К и ~ 100 К). Если положение излома не зависит от температуры — это не тепловая систематика.

4. Критерии успеха и фальсифицируемость

Порог обнаружен, если:

1. Зависимость $Qm(M)$ имеет плоский характер для $D \leq 1,0$ мкм (подпороговые сферы).
2. Добротность Qm резко падает для $D \geq 5,0$ мкм (запороговые сферы) при криогенных температурах T .
3. Падение добротности инвариантно к изменению температуры среды.
4. Наблюдается стабильная воспроизводимость результатов на разных экспериментальных частицах.
5. Экспериментальный порог сдвигается согласно масштабной пропорции $\propto \rho^{-2/5}$ при смене плотности материала внутри кварцевой группы: для базового плавленого кварца ($\rho \approx 2200$ кг/м³) порог строго соответствует $D_{crit} \approx 2,87$ мкм, а при переходе к модификациям с изменённой плотностью критический диаметр прецизионно смещается по предсказанному закону.

Порог отсутствует в доступном диапазоне, если:

1. Наблюдается плавное изменение $Qm(M)$ без излома по массе при всех температурах T — данный результат сужает параметр E_{max} сверху. Отрицательный результат для всех масс вплоть до максимальных (для плавленого кварца — 1152 пг при $D=10$ мкм) сужает верхнюю границу существования предела текучести вакуума E_{max} более чем на два порядка.

Механизм представляет собой чистую декогеренцию, если:

1. Зависимость $Qm(M)$ остаётся плоской при всех температурах T — порог может существовать физически, но оставаться неразличимым через прямое измерение механической добротности Qm . В этом случае необходимы прямые интерферометрические измерения (см. раздел 5).

Наблюдается тепловая систематика, если:

1. Падение добротности Qm зависит от температуры как $\propto 1/T$ — данный тренд указывает на классический температурный эффект, а не на достижение фундаментального порога вакуума.

5. Дальнейшие измерения

Если метод затухания свободных колебаний (рингдаун) обнаруживает искомый порог — температурно-независимый излом $Qm(M)$ вблизи $M \approx 27,1$ пг для

плавленого кварца (SiO_2), — последующие измерения получают ясную целевую траекторию.

Охлаждение до основного состояния: цель сужается до конкретных параметров мишени: масса $\approx 27,1$ пг и диаметр $\approx 2,87$ мкм для плавленого кварца. Это полностью исключает необходимость слепого поиска порога. Эксперимент фокусируется на прицельном охлаждении выделенной моды центра масс в оптической ловушке с использованием активной обратной связи (feedback cooling).

Интерферометрия: осуществляется пространственное расщепление волнового пакета частицы с целью обнаружения превышения скорости декогеренции над классическим тепловым фоном ($\Gamma_c > \Gamma_{th}$). Априорное знание точного положения порога позволяет вести измерения прицельно — в режиме малых превышений над критической массой $M > M_{crit}$, где величина Γ_c становится строго предсказуемой. Плавленый кварц в данном тесте является приоритетным материалом ввиду отсутствия внутренних флуктуаций магнитных доменов и вихрей.

Фазовый дрейф: сигнатурой «проскальзывания фазы» при переходе через порог выступает сдвиг частоты $\Delta\nu = (EG - E_{max})/\hbar$. Данный эффект принципиально отсутствует во всех известных типах классических тепловых систематик и измеряется одновременно с интерферометрическими параметрами. Сдвиг служит прямым макроскопическим сигналом динамического рождения необратимости: ниже порога волновая функция накапливает фазу строго унитарно, тогда как выше порога возникает контролируемый сдвиг, определяемый превышением гравитационной самоэнергии над пределом текучести вакуума.

Отрицательный результат: если порог не обнаруживается во всём доступном диапазоне масс, этот результат также остаётся высокоинформативным, поскольку сужает область существования фундаментального энергетического параметра E_{max} сверху для исследуемой группы материалов на основе диоксида кремния.

6. Следствия

6.1. Рождение необратимости

Порог E_{max} представляет собой точку, в которой время-параметр сменяется временем-процессом. Ниже порога эволюция системы строго унитарна, стрела времени отсутствует, а время выступает исключительно в роли внешнего параметра в уравнении Шрёдингера. В точке порога динамически рождается необратимость: физический вакуум переходит из упругого режима в пластический, поток субстанции (в смысле модели Левича) начинает диссипировать, и включается стрела времени. Данный переход не нарушает положений общей теории относительности ($\varepsilon \sim 10^{-35}$) и не требует наличия горизонта событий. Время как координата на многообразии сохраняет свои свойства; к нему добавляется время как процесс — физический акт диссипации, локализованный в пространстве-времени и однозначно определяемый массой системы.

6.2. Разрешение спора Бора и Эйнштейна

Предложенная модель задаёт чёткую физическую границу между двумя фундаментальными режимами.

Ниже порога (право Бора): квантовая суперпозиция состояний абсолютно реальна и не требует наличия наблюдателя для своего существования.

Выше порога (право Эйнштейна): система ведёт себя как классический объект без привлечения внешнего наблюдателя, поскольку её масса превышает предел текучести вакуума.

В результате проблема измерения и парадокс отложенного выбора Уиллера разрешаются естественным образом: коллапс волновой функции объективен и определяется массой, а не актом регистрации. Фотон (безмассовая частица, для которой $EG=0$) принципиально никогда не достигает порога и способен находиться в состоянии суперпозиции на сколь угодно больших пространственных масштабах. Напротив, детектор («какой путь») является макроскопическим массивным объектом, находящимся выше порога. Коллапс происходит непосредственно в момент взаимодействия фотона с веществом детектора, независимо от того, в какой момент экспериментатор принимает решение зафиксировать результат. Описанный подход полностью совместим с теоремой Белла: коллапс квантового состояния объективен, но принципиально недетерминистичен.

6.3. Мост к квантовой гравитации

Модель указывает на конкретный масштаб, на котором квантовая механика и гравитация стыкуются через механизм бифуркации, а не посредством формального объединения теорий. Ниже порога строго выполняется аппарат квантовой механики без необходимости учёта гравитационных поправок. Выше порога начинает доминировать классическая гравитация, сопровождаемая диссипативными процессами. Физический порог конструируется из комбинации всех четырёх фундаментальных констант: квантовой ($\hbar$), релятивистской (c), гравитационной (G) и космологической (Λ). Таким образом, мост между теориями заключается не в их концептуальном слиянии, а в существовании реальной физической точки фазового перехода.

7. Глобальные следствия и верификационные возможности модели

Предложенный физический порог $E_{\max}$, задаваемый фундаментальной комбинацией констант ($\hbar, c, G, \Lambda$), выводит интерпретацию лабораторных измерений на масштаб универсального закона природы. Если эксперимент на микросферах из плавленого кварца подтверждает излом добротности, это открывает три взаимосвязанных направления глобальной верификации модели.

7.1. Космологические следствия и устранение сингулярностей

Предохранительный клапан Вселенной. В рамках общей теории относительности гравитационный коллапс массивных объектов неизбежно приводит к пространственно-временной сингулярности с бесконечной плотностью. Введение предела текучести вакуума $E_{\max}$ меняет этот сценарий:

при достижении критической плотности упругий режим пространства-времени сменяется пластической диссипацией.

Стабилизация экстремальных объектов. Энергия сжатия начинает расходоваться на внутреннее «трение» о структуру вакуума. Это останавливает катастрофический коллапс и заменяет математический тупик сингулярности стабильным, макроскопическим квазиклассическим состоянием вещества.

7.2. Космологические наблюдательные возможности (СМВ и уравнение Уилера — Девитта)

Аномалии реликтового излучения. Нелинейная диссипация квантовой субстанции на пороге $E_{\max}$ в ранней Вселенной должна была работать как естественный демпфер для первичных неоднородностей. Это даёт строгое объяснение наблюдаемой обсерваториями Planck и WMAP нехватке мощности флуктуаций космического микроволнового фона (СМВ) на больших угловых масштабах (низкие мультиполи), а также предсказывает специфическую нелинейную негауссовость первичного спектра.

Локализация стрелы времени. Модель разрешает проблему времени в квантовой космологии. Глобальная Вселенная статична и описывается уравнением Уилера — Девитта ($H\Psi=0$), где время как процесс отсутствует. Однако в локальных областях, где флуктуации массы преодолевали предел упругости вакуума, уравнение «отпирается»: упругая динамика сменяется диссипативной, локально рождая физическую необратимость и стрелу времени.

7.3. Роль тёмной энергии и физическое заземление нелокальности

Динамический баланс. Космологическая постоянная Λ (тёмная энергия) выступает в модели как модуль упругости вакуума, определяющий величину натяжения пространства. Баланс между квантовой неопределённостью и гравитационным коллапсом удерживается глобальным космологическим фоном. Эксперимент в оптической ловушке — это прямая верификация свойств тёмной энергии в контролируемых лабораторных условиях.

Граница нелокальности Белла. Ниже порога текучести вакуум идеально упруг, что обеспечивает квантовую запутанность и строгое нарушение неравенств Белла на любых расстояниях. В точке порога происходит локализованный, объективный, но недетерминистический коллапс. Нелокальность Белла «заземляется» о пластический предел вакуума, исключая необходимость привлечения внешнего наблюдателя для редукции состояний.

7.4. Биофизические следствия: калибровка моделей Orch OR

Масштаб квантовой биологии. Модель Пенроуза — Хамероффа (Orch OR) постулирует, что акт сознания (схлопывание волновой функции) происходит внутри микротрубочек нейронов. Главным аргументом критиков всегда являлась быстрая тепловая декогеренция в живых тканях.

Численное сопоставление масштабов. Один димер тубулина имеет массу 110 кДа ($\approx 1,83 \times 10^{-7}$ пг). Порог предложенной модели при плотности белка ($\rho \approx 1300$ кг/м³) соответствует массе ~ 30 пг и диаметру $\sim 3,5$ мкм, что эквивалентно

примерно $1,65 \times 10^8$ димерам тубулина. Оценка Пенроуза — Хамероффа для акта Orch OR составляет $\sim 10^9$ тубулинов с общей массой ~ 183 пг. Таким образом, масштаб Orch OR превышает порог модели примерно в 6 раз — обе величины находятся в одном пикограммном диапазоне. Временной масштаб модели $\tau_{vac} = \hbar/E_{max} \approx 5,14$ мс сопоставим с временами когерентности, обсуждаемыми в контексте Orch OR.

Физическая помощь модели Orch OR. Пенроуз в своей формуле $\tau = \hbar/EG$ использует гравитационную самоэнергию разности двух суперпонируемых конфигураций — величину, зависящую от смещения масс и крайне малую. Предложенная модель использует гравитационную самоэнергию всей массы объекта, что даёт существенно больший и лучше определённый масштаб. Главное отличие: модель Пенроуза предсказывает плавный, беспороговый коллапс без чёткого механизма перехода. Предложенная пороговая модель даёт то, чего у Orch OR не было в течение тридцати лет: конкретный физический порог фазового перехода, при котором упругий режим пространства-времени сменяется пластической диссипацией. Биологическая система в этой схеме рассматривается как эволюционно настроенная на работу вблизи порога текучести вакуума.

Биологический аналог ловушки. Верификация порога для плавленого кварца ($D_{crit} \approx 2,87 \text{ мкм}$) предоставляет Orch OR точный физический калибровочный масштаб. Цитоскелет клеток и структурированная вода вблизи мембран представляют собой природный диэлектрический аналог лабораторной ловушки, удерживающий массу биомолекул на грани пластического порога вакуума. Акт осознания в этой схеме тождественен микровзрыву упругости пространства-времени, транслирующему космологические константы в субъективный опыт.

8. Заключение

В настоящей работе предложен и теоретически обоснован принципиально новый механизм объективной редукции волновой функции, основанный на концепции метрической упругости вакуума А. Д. Сахарова и субстанционального времени А. П. Левича. Вместо введения абстрактного внешнего наблюдателя или формального математического объединения квантовой механики и гравитации, в модели продемонстрировано существование реального физического порога фазового перехода.

Основные результаты работы:

1. Сформулировано условие динамического рождения необратимости (стрелы времени по И. Пригожину) как точки бифуркации, в которой упругий режим пространства-времени сменяется пластической диссипацией субстанционального потока.
2. Разрешён фундаментальный спор Н. Бора и А. Эйнштейна: квантовая суперпозиция признана абсолютно реальной ниже порога текучести вакуума, в то время как выше порога система объективно приобретает классическое поведение за счёт собственной массы.
3. Рассчитан конкретный калибровочный масштаб для лабораторной верификации модели. Показано, что для микросфер из диоксида кремния

- (плавленного кварца) критический диаметр перехода составляет $D_{crit} \approx 2,87$ мкм.
4. Установлено численное соответствие между порогом модели и масштабом Orch OR Пенроуза — Хамероффа: обе величины лежат в одном пикограммном диапазоне масс, а предложенная модель даёт механизм фазового перехода, которого у Orch OR не было в течение тридцати лет.
 5. Предложены направления глобальной верификации модели в области космологии (устранение пространственно-временных сингулярностей, объяснение низких мультиполей CMB через демпфирование первичных неоднородностей, локализация стрелы времени в уравнении Уилера — Деви́тта) и биофизики (физическая калибровка параметров квантовой биологии в моделях Orch OR).

Предложенный подход переводит проблему квантовой гравитации из области умозрительных струнных или петельных построений в плоскость проверяемого лабораторного эксперимента, который может быть реализован на стандартном оборудовании оптических ловушек в ближайшее время.

Декларация об использовании искусственного интеллекта

При подготовке данной работы автор использовал виртуальный AI-помощник Алиса AI (Яндекс) для редактирования и форматирования текста, а также преобразования математических выражений в нотацию LaTeX. Автор удостоверяет, что все научные результаты, формулы и выводы принадлежат автору; AI-инструмент применялся исключительно для технического оформления рукописи.

Литература

1. Сахаров А. Д. Вакуумные квантовые флуктуации в искривлённом пространстве и теория гравитации // ДАН СССР. 1967. Т. 177. С. 70–71.
2. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. М.: Мир, 1977.
3. Margolus N., Levitin L. A. The maximum speed of dynamical evolution // Physica D. 1998. V. 120. P. 188–195.
4. Prigogine I. From Being to Becoming. San Francisco: Freeman, 1980.
5. Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process // IBM J. Res. Dev. 1961. V. 5. P. 183–191.
6. Arndt M. et al. Wave-particle duality of C_{60} molecules // Nature. 1999. V. 401. P. 680–682.
7. Delić U. et al. Cooling, levitation and ground-state cooling of a silica nanoparticle // Phys. Rev. Lett. 2020. V. 125. 023603.
8. Rossi M. et al. Quantum delocalization of a levitated nanoparticle // Phys. Rev. Lett. 2025. V. 135. 083601.
9. Hofer J. et al. High-Q magnetic levitation and control of superconducting microspheres at millikelvin temperatures // Phys. Rev. Lett. 2023. V. 131. 043603.
10. Ranjit G. et al. Attonewton force detection using microspheres in a dual-beam optical trap in high vacuum // Phys. Rev. A. 2015. V. 91. 051805(R).
11. Zurek W. H. Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical // Rev. Mod. Phys. 2003. V. 75. P. 715–775.

12. Diósi L. A universal master equation for the gravitational violation of quantum mechanics // Phys. Lett. A. 1987. V. 120. P. 377–381.
13. Penrose R. On gravity's role in quantum state reduction // Gen. Relativ. Grav. 1996. V. 28. P. 581–600.
14. Donadi S. et al. Underground test of gravity-related wave function collapse // Nature Physics. 2021. V. 17. P. 74–78.
15. Ghirardi G. C., Rimini A., Weber T. Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems // Phys. Rev. D. 1986. V. 34. P. 470–491.
16. Bassi A. et al. Models of wave-function collapse, underlying theories, and experimental tests // Rev. Mod. Phys. 2013. V. 85. P. 471–527.
17. Carlesso M. et al. LISA Pathfinder appreciably constrains collapse models // Phys. Rev. D. 2017. V. 95. 084057.
18. Goodfellow. Lead powder, spherical, product specifications. goodfellow.com
19. Левич А. П. Субстанциональная концепция времени и генерирующие потоки // Успехи физических наук. 1995. Т. 165. С. 1325–1343.
20. Hameroff S., Penrose R. Consciousness in the universe: a review of the 'Orch OR' theory // Phys. Life Rev. 2014. V. 11. P. 39–78.
21. Tegmark M. Importance of quantum decoherence in brain processes // Phys. Rev. E. 2000. V. 61. P. 4194–4206.