

Обучающаяся материя или сложная релаксация?

Резервуарные вычисления и эффекты памяти в недрах планет и звёзд

Аннотация. Может ли внутренняя материя планет и звезд реализовывать функции, аналогичные нейронным сетям? Автор представляет операционную структуру, основанную на резервуарных вычислениях, чтобы отличить общую диссипативную релаксацию от физического обучения, показывая, что граница между ними является измеримой физической величиной. Три зрелые области — физика конденсированного состояния недр планет и звёзд, теория физических сетей и резервуарных вычислений, наука о системе Земли — развивались практически без взаимного контакта. Их пересечение порождает вопрос, ранее не формулировавшийся как исследовательская программа: способно ли вещество недр планет и звёзд реализовывать функции, аналогичные функциям нейронных сетей в нервных системах, и могут ли системы «звезда–планета–жизнь» удовлетворять формальным критериям самообучения? Автор (i) вводит операционный аппарат, разграничивающий сетевую функциональность, метафору и диссипативную релаксацию; (ii) проводит обзор субстратов недр по измеримым критериям резервуара, явно идентифицируя проблему считывателя для неживых сред; (iii) показывает, что каноническое возражение о термическом разрушении структур недействительно на макроскопических масштабах; (iv) количественно анализирует каналы связи, включая нейтринный канал — асимметричный диод «чтение–запись»; (v) формулирует фальсифицируемый набор гипотез H_0 – H_9 ; (vi) указывает лабораторные, численные и наблюдательные тесты с предрегистрированными правилами решений. Настоящий текст является программным документом, а не исследовательским результатом. Граница между релаксирующей и обучающейся материей представляет собой экспериментально доступную физическую величину. Все количественные оценки и гипотезы, опровергающие их, подробно описаны в тексте.

Ключевые слова: резервуарные вычисления; спиновые стёкла; нейтронные звёзды; ядерная паста; суперионный лёд; геодинамо; самоорганизованная критичность; взаимодействие звезда–планета; нейтринный канал; Гайя; граница релаксации и обучения

Поле Комментарии: 18 страниц, 2 таблицы. Программная статья / Перспектива. Комментарии по формализации границы релаксации и обучения приветствуются.

1. Введение

Программные статьи ставят целью открытие направлений, а не сообщение результатов. Среди исторических прецедентов — работа Шрёдингера «Что такое жизнь?» [1], гипотеза Гайи [2], оценка Ллойдом вычислительной ёмкости Вселенной [3]. Параллельная линия: живое вещество Вернадского [4], коэволюция биосферы и техносферы Моисеева [5], современная формулировка интеллекта как планетарного процесса [6]. Автор ссылается на эти прецеденты не для того, чтобы претендовать на сопоставимое влияние, а чтобы указать на жанр настоящего текста: структурированное предложение исследовательской программы, а не отчёт о результатах.

Основной вопрос. Реализует ли вещество недр планет и звёзд функции, аналогичные тем, которые нейронные сети реализуют в мозге, и если да, то чего формально недостаёт для обучения на системном уровне? Автор намеренно использует оборот «аналогичные тем». Программа не утверждает, что звёзды мыслят. Утверждается лишь: (а) сетевая структура строго операционализуема; (б) известная физика недр допускает субстраты, удовлетворяющие существенной части критериев; (в) граница между необученной сетью и обучающейся системой является измеримой физической величиной.

Три барьера препятствовали постановке вопроса.

(i) Молекулярный барьер. Температуры недр разрушают химические связи, откуда следует вывод «структур нет». В разделе 2.3 показано, что этот аргумент неправомерно переносится на макроскопические коллективные переменные.

(ii) Телеологический барьер. Формальная теория обучения не требует цели. Вместе с тем отсутствие цели не гарантирует, что результирующая динамика является вычислительно нетривиальной, а не просто релаксацией.

(iii) Дисциплинарный барьер. Гелиосейсмолог не читает литературу по экосостояниям; специалист по резервуарным вычислениям не слышал о ядерной пасте. Настоящая статья задумана прежде всего как словарь и лишь затем как манифест.

Объём и ограничения. Текст не содержит новых экспериментальных данных, численных расчётов или аналитических результатов. Это синтез и предложение. Все количественные оценки заимствованы из цитируемой литературы.

2. Операционные критерии

2.1. Сетевая структура

Сетевая система — это тройка $\langle S, T, P \rangle$: множество узлов S с дискретными или метастабильными состояниями; топология T , задающая связи переменной силы; пороговая динамика P — нелинейное отображение «вход–выход» с барьером активации. Минимальная модель пороговых вычислений [7] в формулировке Хопфилда [9] — гамильтониан спинного стекла [8]:

$$H = -(1/2) \cdot \sum_{ij} T_{ij} \cdot s_i \cdot s_j \quad (1)$$

Любая среда с фрустрированной решёткой взаимодействий является сетью в этом функциональном смысле. Открытые вопросы: статистика T_{ij} , наличие и характер пластичности (правило Хебба [13] — минимальный случай [10–12]) и — критически важно — обеспечивает ли сеть зависящий от истории отклик при фиксированных мгновенных параметрах, выходящий за пределы обычной релаксации.

Важная оговорка. Приведённое определение намеренно широко. Ему удовлетворяют спинные стёкла, закреплённые вихревые решётки, геодинамо и — тривиально — любая система с множеством метастабильных состояний и нелинейными связями. Широта необходима на программной стадии, но недостаточна для утверждения о вычислении. Раздел 4 посвящён операционному разграничению.

2.2. Резервуар

Среда является резервуаром, если удовлетворяет трём измеримым условиям [14, 15]: свойство эхо-состояния, свойство разделения, затухающая память. Резервуарные вычисления универсальны на произвольных нелинейных диссипативных средах при наличии обучаемого считывателя [16–19], работают в режиме сильной хаотичности [17] и имеют лабораторные реализации без нейронов [16, 19]. Физическое обучение «снизу» продемонстрировано: пассивные резисторные сети выполняют градиентный спуск без цифрового контроллера [20]; топологические дефекты реализуют синаптическую пластичность [21].

Проблема считывателя. Резервуар без считывателя представляет собой диссипативную среду со сложной переходной динамикой — физически интересную, но не вычислительное устройство. Для сред недр вопрос о считывателе остаётся открытым. Кандидаты: (а) связанная подсистема, считывающая состояние резервуара (например, магнитосфера планеты, считывающая геодинамо); (б) внешний наблюдатель, выполняющий томографию (например, астросейсмология); (в) при наличии биосферы — отбор как неявный считыватель (раздел 6). Автор идентифицирует эту

проблему как центральный пробел между утверждением «среда удовлетворяет критериям резервуара» и утверждением «среда вычисляет».

2.3. Масштабозависимая шумовая изоляция

Равнораспределение приписывает каждому гармоническому моду среднюю тепловую энергию $k_B \cdot T$ независимо от масштаба. Критерий жизнеспособности метастабильного состояния:

$$E_{\text{switch}} / (k_B \cdot T) \gg 1 \quad (2)$$

со временем жизни конфигурации

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp(E_b / (k_B \cdot T)) \quad (3)$$

Для отдельных молекул при звёздных температурах условие (2) не выполняется. Для макроскопических коллективных конфигураций оно выполняется с огромным запасом: энергия геомагнитного поля $\sim 10^{20} - 10^{21}$ Дж даёт $E/(k_B \cdot T) \sim 10^{40}$; метастабильные состояния коры нейтронных звёзд имеют времена жизни, превышающие возраст Вселенной. Тепловой шум ограничивает плотность упаковки сетевых состояний, но не их существование. Этот аргумент снимает наиболее распространённое возражение, но сам по себе не устанавливает вычислительной значимости.

2.4. Самообучающаяся система

Самообучающаяся система определяется двухмасштабной динамикой:

$$dx/dt = F(x, w); dw/dt = \varepsilon \cdot G(x, w; R), \varepsilon \ll 1 \quad (4)$$

где x — быстрые состояния, w — медленные веса, G — правило модификации, R — сигнал качества. Хеббовская пластичность и дарвиновский отбор являются частными случаями. Кандидаты в «учителя», доступные неживой природе: термодинамика предсказания [24], диссипативная адаптация [25, 26], автокаталитическая фиксация [27]; вблизи равновесия — соотношения взаимности Онсагера [22] и диссипативные структуры [23]. Метрики для разграничения обучения и релаксации: предиктивная информация [29], ε -машины [28].

Критическое замечание. Уравнение (4) удовлетворяется чрезвычайно широким классом физических систем. Содержательность утверждения об «обучении» полностью определяется природой R . Если R отсутствует или тривиален, система не обучается в каком-либо вычислительно осмысленном смысле — она релаксирует. Гипотеза Н7 адресует эту границу явно.

Вставка 1. Иерархия утверждений. Аналогия $\rightarrow$ статистический изоморфизм $\rightarrow$ резервуарная функциональность (измерима) $\rightarrow$ обучение (уравнение (4) с нетривиальным R ; измеримо). Только последние два уровня являются научными утверждениями.

3. Субстраты недр

Автор проводит обзор субстратов-кандидатов по критериям раздела 2. Таблица 1 обобщает ключевые свойства.

Таблица 1. Субстраты недр и их сетевые свойства.

Среда	Сетевая переменная	Метастабильность / память	Пороговая динамика	Кандидат в считыватели	Осн. ссылки
Ядерная паста (кора нейтронных звёзд, $\rho = 10^{11} - 10^{14} \text{ г/см}^3$)	Топология дефектов (фазы «спагетти», «лазанья», «ньюкки»)	Стеклообразное старение; МД-моделирование показывает эффекты памяти [32]	Предел текучести (рекордная прочность на сдвиг [31])	Гравитационно-волновое излучение при разрушении коры	[30–33]
Вихрево-флюксоидная сеть (внутренние слои нейтронных звёзд)	Положения вихрей/флюксоидов и конфигурация закрепления	Термически активированный крип; глитч-лавины [36]	Барьер закрепления/открепления	Тайминговые остатки, статистика глитчей, тепловое рентгеновское излучение	[34–37]
Кристалл белого карлика	Структура кристаллических доменов	Последовательность кристаллизации; седиментация ^{22}Ne [40]	Барьер нуклеации	Функция светимости («куча» Gaia [39]), астросейсмология	[38–42]
Суперионный лёд (недра ледяных гигантов)	Кислородная подрешётка + протонная дефектная динамика	Смешанная твёрдо-жидкая фаза; сложный дефектный ландшафт	Барьер протонной диффузии	Морфология магнитного поля (будущие орбитальные аппараты)	[43–45]
Геодинамо	Топология конвективных ячеек; конфигурация магнитного поля	Бистабильная стохастическая система; кластеризация инверсий [51]	Порог конвекции / инверсии	Палеомагнитная запись; спутниковая магнитометрия	[50–55]
Осцилляционная полость звезды (звёзды солнечного типа)	Амплитуды и связи нормальных мод	$10^6 - 10^7$ мод [56]; реликтовые поля $\geq 10^9$ лет [58]	Порог возбуждения моды	Астросейсмология (TESS, PLATO)	[56–62]
Разреженное ядро Юпитера	Структура градиента состава	Частично растворённое ядро из тяжёлых элементов [46]	Композиционный барьер	Гармоники гравитационного поля (Juno)	[46–49]

Число элементов. Плотности вихрей и флюксоидов задаются выражениями

$$n_v = 2\Omega / \kappa, \text{ где } \kappa = h / (2m_n) \quad (5)$$

$$n_\Phi = B / \Phi_0, \text{ где } \Phi_0 = h / (2e) \quad (6)$$

что даёт $\sim 10^{17}$ вихрей и $\sim 10^{31}$ флюксоидов. Автор указывает эти числа для полноты, но подчёркивает, что само по себе число элементов не является вычислительным аргументом: существенны структура связности, наличие направленных петель и существование правил пластичности.

4. Универсальность пороговых систем и её операционные пределы

Степенные лавины универсальны для пороговых систем [54, 63–66].
Нейронные лавины при коэффициенте ветвления

$$\sigma_{\text{branch}} \approx 1 \quad (7)$$

разделяют скейлинговые показатели с последовательностями землетрясений, солнечными вспышками и глитчами нейтронных звёзд [67, 68]. Совпадение показателей устанавливает принадлежность к классу универсальности, но не вычисление.

Операционное разграничение. Среда вычисляет только в том случае, если помимо статистики лавин она удовлетворяет критериям резервуара раздела 2.2 и проявляет зависящий от истории отклик при фиксированных мгновенных параметрах. Смещение универсальной релаксации с универсальным вычислением является центральным методологическим риском программы.

5. Каналы связи

5.1. Приливный и резонансный

Резонансное захватывание [69], подтверждённое для спутников Сатурна [70], реализует уравнение (4) с $\varepsilon \sim 10^{-10}$.

5.2. Магнитное взаимодействие звезда–планета

Орбитально-фазированные хромосферные горячие пятна [71], измеренные поля горячих юпитеров [72], обзор [73].

5.3. Нейтринный канал: диод «чтение–запись» с термическим замыканием

Чтение. Нейтрино — единственный прямой сигнал из недр. Вещество модулирует поток через эффект МСВ [74, 75]; геонейтринная спектроскопия читает состав недр [77, 78]; спектры pp-цепочки и CNO-цикла служат термометром ядра в реальном времени [79, 80]. Когерентное упругое нейтрино-ядерное рассеяние (COHERENT [81]) с сечением

$$\sigma \approx (G_F^2 / 4\pi) \cdot Q_w^2 \cdot E_\nu^2, \quad Q_w \approx N$$

является наиболее сильным из доступных нейтрино-вещественных взаимодействий.

Запись закрыта. Вероятность взаимодействия при пролёте через Землю составляет

$$P_{\text{int}} \approx \sigma_{\text{coh}} \cdot N_{\text{col}} \approx 10^{-6} - 10^{-8} \quad (8)$$

Полный нагрев Земли солнечными нейтрино составляет $\sim 1\text{--}10$ Вт против $4,7 \times 10^{13}$ Вт геотермального потока — дефицит 12–13 порядков. Запись открывается лишь при нейтринной оптической глубине $\tau_\nu \geq 1$ (коллапс ядра)

[86, 87]. Единственный режим полной записи не модулирует субстрат, а задаёт его начальные условия.

Узел звезда–планета: устойчивая петля отсутствует. Отсутствие является структурным. Арифметика: поток геонейтрино у Солнца $\sim 10^{-2} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ против собственного поверхностного потока звезды $\sim 10^{14}–10^{15} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ (дефицит 16–17 порядков). Топология: нет нейтринной сферы захвата ($3GM/c^2 \approx 4,4 \text{ км} \ll R_{\odot} = 696\,000 \text{ км}$). Симметрия: приливной тензор планеты в ядре звезды безследов ($\nabla^2\Phi = 0$).

Термический синапс. Скорость крипа вихревой сети экспоненциально зависит от внутренней температуры, определяемой нейтринным охлаждением (модифицированные урка-процессы [93]):

$$v_{\text{creep}} \propto \exp(-E_b / (k_B \cdot T_i)); L_v(\text{Урка}) \propto T_i^8 \quad (9)$$

Нейтринный сектор управляет временным масштабом пластичности сети без внешнего потока (Н8, Н9).

Следствие для программы. Нейтринный анализ показывает, что наиболее проникающий сигнал из недр является каналом только чтения в нормальных условиях. Любая петля обратной связи с участием нейтрино должна замыкаться через иной физический канал или через биосферный агент. Диодная структура ограничивает архитектуру возможных «обучающихся» систем, но не снимает вопрос.

6. Жизнь как правило пластичности

В терминах уравнения (4) гипотеза Гайи [2] утверждает, что при наличии биосферы правило модификации G приобретает нетривиальный сигнал качества R . Минимальная модель — Дейзиворлд [95]; современная формулировка — отбор сред [96, 97].

Обязательная критика. Сильная Гайя неverifiedируема и, вероятно, ложна [99, 100]. Слабая коэволюционная Гайя подтверждаема. Известные ограничения Дейзиворлда — отсутствие реального отбора, параметрическая настройка [95] — означают, что он служит доказательством существования, а не количественной моделью. Эмпирическое содержание Н5 должно быть получено из сравнительной планетологии.

7. Гипотезы

Идент.	Название	Утверждение (кратко)	Фальсификатор
H0	Апофеническая нулевая	Все явления §§3–5 объясняются стандартной физикой; совпадения = класс универсальности	Систематическая неспособность нулевых моделей воспроизвести зависящий от истории отклик
H1	Универсальность субстрата	Среды типа недр, удовлетворяющие (2), реализуют резервуарную функциональность в лабораторных аналогах	Систематическое отсутствие эхосостояния во всех тестируемых средах
H2	Память недр	Среды из табл. 1 записывают историю (степенная релаксация, старение, гистерезис)	Чисто экспоненциальная релаксация, отсутствие гистерезиса повсеместно
H3	Сильная универсальность каскадов	Лавины в недрах и нейронные лавины разделяют динамику ветвления, а не только статические показатели	Расхождение по динамическим маркерам
H4	Связь звезда–планета	Когерентные орбитально-периодические воздействия накапливаются во внутренних резонансных модах	Фазовые корреляции на уровне случайности в больших выборках
H5	Биосферное правило	Планета с биосферой удовлетворяет (4) с определённым отбором R; стерильная планета лишь релаксирует	Отсутствие измеримого различия в свойствах обратной связи по сравнению с абиотическими аналогами
H6	Нейтринный диод	Чтение открыто при всех плотностях; запись открывается только при $\tau_{\nu} \geq 1$; петля звезда–планета топологически отсутствует	Детектирование нейтрино-индуцированного структурного отклика при $\tau_{\nu} \ll 1$
H7	Принцип учителя	Без репликативного отбора среды реализуют пластичность как релаксацию	Среда, проявляющая обобщение без какого-либо идентифицируемого R
H8	Термический синапс	Скорость пластичности вихревой сети экспоненциально зависит от T_i через ν -охлаждение (уравнение 9)	Статистика восстановления после глитчей не зависит от термической стадии
H9	Термонейтринное замыкание	ν -сектор замыкает структурные петли обратной связи калорически во всех конденсированных звёздах	Наблюдаемое разделение ν -эффективности и структурной эволюции

8. Исследовательская программа

8.1. Лабораторные исследования

Суперионный лёд с модулированным входом (H1)

Закреплённая вихревая материя: лавины, старение (H2, H3)

Эксперименты с возбуждённым динамо с периодическим воздействием (аналог H4)

Самообучающиеся резисторные сети [20] как контроли для H7

Молекулярная динамика ядерной пасты с графовыми метриками (H1, H2)

8.2. Наблюдательные исследования

Астросейсмология TESS/PLATO (H4)

Статистика глитчей и тепловое рентгеновское мониторинговое наблюдение (H2, H8)

Палеомагнитная статистика инверсий через биосферные события (H5)

Нейтрино: прецизионная асимметрия день–ночь, временные ряды геонейтрино, сети готовности к сверхновым (H6)

Популяционные измерения CNO-нейтрино; популяционный анализ охлаждения белых карликов (Gaia, Q-ветвь) (H9)

8.3. Теоретические исследования

Минимальный R; обобщённые правила пластичности

Бюджеты предиктивной информации для субстратов-кандидатов

Самосогласованные модели кристаллизации и ν -эффективности (H9)

Формальный анализ проблемы считывателя

8.4. Инфраструктура

Открытый глоссарий; репозиторий данных в едином формате; предрегистрированные правила решений; серия рабочих совещаний

9. Эпистемические оговорки

Апофения. Процедурные контрмеры: равновесные референсные состояния; рандомизированные графы с сохранённым распределением степеней; временное перемешивание; линейные суррогаты. H0 — позиция по умолчанию.

Метафора и механизм. Морфометрические сходства между космической паутиной и нейронным кортексом [102] и аналогии сетевой космологии [103] являются фактами о статистике, а не о функции. Все утверждения настоящей программы находятся на уровнях 3–4 Вставки 1.

Оговорка скромности. Если все десять гипотез выживают лишь в слабейшей форме, результатом программы является строгая характеристика того, почему вещество недр не является мозгом, — что само по себе нетривиальный научный результат и предпосылка для любого будущего прогресса.

10. Заключение

Исторические запреты на сетевые структуры в недрах основывались на неправомерно перенесённом молекулярном аргументе; они заменены масштабозависимым критерием (2)–(3). Среда недр реализует существенную часть сетевых и резервуарных критериев. Нейтринный канал является асимметричным диодом: чтение открыто, запись закрыта в нормальных условиях. Единственный структурно отсутствующий элемент неживой природы — механизм фиксации полезности, нетривиальный R. Глубочайший результат, на который автор претендует, состоит в том, что граница между релаксирующей и обучающейся материей является измеримой физической величиной и что инструменты для её измерения существуют. Настоящая статья — предложение сформировать сообщество, которое это сделает.

Доступность данных. Концептуальный синтез; все поддерживающие данные содержатся в цитируемой литературе.

Заявление об использовании инструментов ИИ

При подготовке рукописи автор использовал инструменты на основе больших языковых моделей (ИИ-ассистенты) для помощи в структурировании междисциплинарного материала, стилистическом редактировании и оформлении таблиц. Формулировка физических гипотез, критический анализ термодинамических ограничений (в частности, нейтринного канала) и верификация всех количественных оценок и библиографических ссылок выполнены автором самостоятельно. Автор несёт полную ответственность за научное содержание и оригинальность представленной работы.

Список литературы

1. Шрёдингер Э. Что такое жизнь? Физический аспект живой клетки. М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002. [Пер. с англ.: Schrödinger E. What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1944.]
2. Lovelock J.E., Margulis L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: the Gaia hypothesis // *Tellus*. 1974. Vol. 26. P. 2–10.
3. Lloyd S. Computational capacity of the universe // *Phys. Rev. Lett.* 2002. Vol. 88. 237901.
4. Вернадский В.И. Биосфера. М.: Наука, 1989. [Англ. пер.: Vernadsky V.I. The Biosphere. New York: Springer, 1998.]
5. Моисеев Н.Н. Алгоритмы развития. М.: Наука, 1987.
6. Frank A., Grinspoon D.H., Walker S.I. Intelligence as a planetary-scale process // *Int. J. Astrobiol.* 2022. Vol. 21. P. 215–228.
7. McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // *Bull. Math. Biophys.* 1943. Vol. 5. P. 115–133.
8. Sherrington D., Kirkpatrick S. Solvable model of a spin-glass // *Phys. Rev. Lett.* 1975. Vol. 35. P. 1792–1796.
9. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1982. Vol. 79. P. 2554–2558.
10. Amit D.J., Gutfreund H., Sompolinsky H. Spin-glass models of neural networks // *Phys. Rev. A*. 1985. Vol. 32. P. 1007–1018.
11. Mézard M., Parisi G., Virasoro M.A. Spin Glass Theory and Beyond. Singapore: World Scientific, 1987.
12. Fischer K.H., Hertz J.A. Spin Glasses. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1991.

13. Hebb D.O. The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory. New York: Wiley, 1949.
14. Jaeger H. The "echo state" approach to analysing and training recurrent neural networks. GMD Report 148. Bonn: German National Research Center for Information Technology, 2001.
15. Maass W., Natschläger T., Markram H. Real-time computing without stable states: a new framework for neural computation based on perturbations // Neural Comput. 2002. Vol. 14. P. 2531–2560.
16. Tanaka G., Yamane T., Héroux J.-B. et al. Recent advances in physical reservoir computing: a review // Neural Networks. 2019. Vol. 115. P. 100–123.
17. Pathak J., Lu Z., Hunt B.R., Girvan M., Ott E. Using machine learning to replicate chaotic attractors and calculate Lyapunov exponents from data // Phys. Rev. Lett. 2018. Vol. 120. 024102.
18. Nakajima K. Physical reservoir computing — an introductory perspective // Jpn. J. Appl. Phys. 2020. Vol. 59. SKKA01. [arXiv:2004.05857.]
19. Stern M.D., Murugan A. Learning with physical systems // Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 2023. Vol. 14. P. 417–439.
20. Dillavou B., Keim N., Liu A.J., Yaida S. Learning without a digital computer // Phys. Rev. Lett. 2022. Vol. 128. 188302.
21. Song K.M., Han H.-K., Je S.-G. et al. Skyrmion-based synaptic plasticity for neuromorphic computing // Nat. Electron. 2020. Vol. 3. P. 148–155.
22. Onsager L. Reciprocal relations in irreversible processes. I // Phys. Rev. 1931. Vol. 37. P. 405–426.
23. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems: From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. New York: Wiley, 1977. [Рус. пер.: Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М.: Мир, 1979.]
24. Still S., Sivak D.A., Bell A.J., Crooks G.E. Thermodynamics of prediction // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109. 120604.
25. England J.L. Statistical physics of self-replication // J. Chem. Phys. 2013. Vol. 139. 121923.
26. Perunov N., Marsland R.A., England J.L. Statistical physics of adaptation // Nat. Phys. 2016. Vol. 12. P. 1176–1181.
27. Kauffman S.A. Autocatalytic sets of proteins // J. Theor. Biol. 1986. Vol. 119. P. 1–24.
28. Crutchfield J.P., Young K. Inferring statistical complexity // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 63. P. 105–108.
29. Bialek W., Nemenman I., Tishby N. Predictability, complexity, and mutual information // Neural Comput. 2001. Vol. 13. P. 2409–2463.
30. Ravenhall D.G., Pethick C.J., Wilson J.R. Structure of matter below nuclear saturation density // Phys. Rev. Lett. 1983. Vol. 50. P. 2066–2069.

31. Horowitz C.J., Kadau K. Breaking strain of neutron star crust and gravitational waves // *Phys. Rev. Lett.* 2009. Vol. 102. 191102.
32. Horowitz C.J., Berry D.K., Brown E.F. Nuclear pasta and the crust of neutron stars // *Phys. Rev. E.* 2010. Vol. 81. 046116.
33. Caplan M.E., Horowitz C.J. Astromaterial science and nuclear pasta // *Rev. Mod. Phys.* 2017. Vol. 89. 041002.
34. Anderson P.W., Itoh N. Pulsar glitches and restlessness as a hard superfluidity phenomenon // *Nature.* 1975. Vol. 256. P. 25–27.
35. Alpar M.A., Anderson P.W., Pines D., Shaham J. Vortex creep and the internal temperature of neutron stars // *Astrophys. J.* 1984. Vol. 276. P. 325–334.
36. Melatos A., Peralta C., Wyithe J.S.B. Avalanche models of pulsar glitches // *Astrophys. J.* 2008. Vol. 672. P. 1103–1111.
37. Lattimer J.M., Prakash M. Neutron star structure and the equation of state // *Phys. Rep.* 2007. Vol. 442. P. 109–165.
38. van Horn H.M. White dwarfs and the age of the universe // *Astrophys. J.* 1968. Vol. 151. P. 227–240.
39. Tremblay P.-E., Fontaine G., Freckelton N. et al. Core crystallization and pile-up in the cooling sequence of white dwarfs // *Nature.* 2019. Vol. 565. P. 202–206.
40. Blouin S., Daligault J., Saumon D. ^{22}Ne sedimentation in white dwarfs // *Astrophys. J. Lett.* 2021. Vol. 911. L5.
41. Farihi J. White dwarfs as archives of planetary systems // *New Astron. Rev.* 2016. Vol. 71. P. 9–21.
42. De K. et al. A white dwarf engulfing a planet // *Nature.* 2023. Vol. 618. P. 917–920.
43. Millot M., Coppari F., Rygg J.R. et al. Evidence for superionic ice in water at high pressure // *Science.* 2018. Vol. 360. P. 771–775.
44. Millot M., Eggert J.-H., Hamel S. et al. Nanosecond X-ray diffraction of superionic ice // *Nature.* 2019. Vol. 569. P. 251–255.
45. Redmer R., Mattsson T.R., Nettelmann N. The phase diagram of water and the magnetic fields of Uranus and Neptune // *Icarus.* 2011. Vol. 211. P. 798–803.
46. Wahl S.M., Helled R., Miguel Y. et al. Comparing Jupiter interior structure models to Juno gravity measurements and the impact of an extended core // *Geophys. Res. Lett.* 2017. Vol. 44. P. 4649–4659.
47. Ashcroft N.W. Metallic hydrogen: a high-temperature superconductor? // *Phys. Rev. Lett.* 1968. Vol. 21. P. 1748–1749.
48. McMahon J.M., Morales M.A., Pierleoni C., Ceperley D.M. The properties of hydrogen and helium under extreme conditions // *Rev. Mod. Phys.* 2012. Vol. 84. P. 1605–1653.

49. Knudson M.D., Desjarlais M.P., Becker A. et al. Direct observation of an abrupt insulator-to-metal transition in dense liquid deuterium // *Science*. 2015. Vol. 348. P. 1455–1458.
50. Glatzmaier G.A., Roberts P.H. A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal // *Nature*. 1995. Vol. 377. P. 203–209.
51. Biggin A.J., Dekkers M.J., Paterson M.S. et al. Palaeomagnetic field intensity variations suggest Mesozoic field reversals // *Nat. Geosci.* 2012. Vol. 5. P. 526–530.
52. Dieterich J.H. Modeling of rock friction: 1. Experimental results and constitutive equations // *J. Geophys. Res.* 1979. Vol. 84. P. 2161–2168.
53. Ruina A.L. Slip instability and state variable friction laws // *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88. P. 10359–10370.
54. Bak P., Tang C. Earthquakes as a self-organized critical phenomenon // *J. Geophys. Res.* 1989. Vol. 94. P. 15635–15637.
55. Abe S., Suzuki N. Scale-free network of earthquakes // *Europhys. Lett.* 2004. Vol. 65. P. 581–586.
56. Christensen-Dalsgaard J. Helioseismology // *Rev. Mod. Phys.* 2002. Vol. 74. P. 1073–1129.
57. García R.A., Turck-Chièze S., Boumier P. et al. Tracking solar gravity modes: the quest for the Sun's interior rotation // *Science*. 2007. Vol. 316. P. 1591–1593.
58. Stello D., Cantiello M., Bildsten F. et al. Asteroseismology of red giants: core fossil fields // *Nature*. 2016. Vol. 529. P. 364–367.
59. Charbonneau P. Dynamo models of the solar cycle // *Living Rev. Sol. Phys.* 2010. Vol. 7. P. 3.
60. Rieutord M., Valdettaro L. Viscous dissipation by tidally forced inertial modes in a rotating spherical shell // *J. Fluid Mech.* 1997. Vol. 341. P. 77–99.
61. Ogilvie G.I., Lin D.N.C. Tidal dissipation in rotating giant planets // *Astrophys. J.* 2004. Vol. 610. P. 477–509.
62. Goodman J., Lackner C. Tidally excited oscillations in stars // *Astrophys. J.* 2009. Vol. 696. P. 2054–2065.
63. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality: an explanation of the 1/f noise // *Phys. Rev. Lett.* 1987. Vol. 59. P. 381–384.
64. Lu E.T., Hamilton R.J. Avalanches of the distribution of solar flares // *Astrophys. J. Lett.* 1991. Vol. 380. P. L89–L92.
65. Ашванден М.Дж. Самоорганизованная критичность в астрофизике. Статистика нелинейных процессов во Вселенной. М.: Физматлит, 2015. [Пер. с англ.: Aschwanden M.J. Self-Organized Criticality in Astrophysics. Berlin: Springer, 2011.]

66. Sethna J.P., Dahmen K.A., Myers C.R. Crackling noise // *Nature*. 2001. Vol. 410. P. 242–250.
67. Beggs J.M., Plenz D. Neuronal avalanches in neocortical circuits // *J. Neurosci*. 2003. Vol. 23. P. 11167–11177.
68. Muñoz M.A. Colloquium: criticality and dynamical scaling in living systems // *Rev. Mod. Phys.* 2018. Vol. 90. 015001.
69. Fuller J., Luan J., Quataert E. Resonance locking in giant planets // *Science*. 2016. Vol. 354. P. 48–51.
70. Lainey V., Baillié N., Charnoz A. et al. Resonance locking in Saturn's moons // *Nat. Astron.* 2020. Vol. 4. P. 1053–1058.
71. Shkolnik E.L., Laming J.M. Chromospheric hot spots in close-in exoplanets // *Astrophys. J. Lett.* 2002. Vol. 578. P. L153–L156.
72. Cauley P.W., Shkolnik E.L., Llama J.L. et al. A strong planetary magnetic field around a hot Jupiter // *Nat. Astron.* 2019. Vol. 3. P. 1128–1132.
73. Poppenhaeger K. Magnetic star–planet interaction // *Handbook of Exoplanets* / Ed. by H.J. Deeg, J.A. Belmonte. Cham: Springer, 2018. P. 1–22.
74. Wolfenstein L. Neutrino oscillations in matter // *Phys. Rev. D*. 1978. Vol. 17. P. 2369–2374.
75. Михеев С.П., Смирнов А.Ю. Резонансное усиление осцилляций нейтрино в веществе и спектроскопия солнечных нейтрино // *Ядерная физика*. 1985. Т. 42. С. 1441–1448. [Англ. пер.: Mikheyev S.P., Smirnov A.Yu. // *Sov. J. Nucl. Phys.* 1985. Vol. 42. P. 913–917.]
76. Abe K. et al. (Super-Kamiokande Collaboration). Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-IV // *Phys. Rev. D*. 2016. Vol. 94. 052010.
77. Araki T. et al. (KamLAND Collaboration). Experimental investigation of geologically produced antineutrinos with KamLAND // *Nature*. 2005. Vol. 436. P. 499–503.
78. Bellini G. et al. (Borexino Collaboration). Measurement of geo-neutrinos with 1353 live days of Borexino // *Phys. Lett. B*. 2010. Vol. 687. P. 299–304.
79. Borexino Collaboration. First direct measurement of the pp solar neutrino flux // *Nature*. 2018. Vol. 562. P. 505–510.
80. Agostini M. et al. (Borexino Collaboration). Comprehensive measurement of pp-chain neutrinos // *Nature*. 2020. Vol. 587. P. 577–582.
81. Akimov D. et al. (COHERENT Collaboration). Observation of coherent elastic neutrino–nucleus scattering // *Science*. 2017. Vol. 357. P. 1123–1126.
82. Drukier A., Freese K., Baum S. Palaeo-detectors: searching for neutrino tracks in minerals // *Phys. Rev. D*. 2019. Vol. 99. 063002. [arXiv:1811.06444.]

83. Stancil D.D. et al. Neutrino–nucleus cross sections for coherent elastic scattering // *Mod. Phys. Lett. A*. 2012. Vol. 27. 1250077.
84. Huber P. Neutrino cross-sections at low energies // *Phys. Rev. C*. 2011. Vol. 84. 024617. [arXiv:1008.3702.]
85. Hirata K. et al. (Kamiokande-II Collaboration). Observation of a neutrino burst from the supernova SN 1987A // *Phys. Rev. Lett.* 1987. Vol. 58. P. 1490–1493.
86. Bethe H.A., Wilson J.R. Revival of a stalled supernova shock by neutrino heating // *Astrophys. J.* 1985. Vol. 295. P. 14–23.
87. Janka H.-T., Langanke K., Marek A., Martínez-Pinedo G., Müller B. Theory of core-collapse supernovae // *Phys. Rep.* 2007. Vol. 442. P. 38–74.
88. Thorne K.S., Żytkow A.N. Stars with degenerate neutron cores. I. Structure of equilibrium models // *Astrophys. J.* 1977. Vol. 212. P. 832–858.
89. Раффельт Г. Звёзды как лаборатории фундаментальной физики: Астрофизическая физика аксионов, нейтрино и майоранов. М.: Физматлит, 2001. [Пер. с англ.: Raffelt G.G. Stars as Laboratories for Fundamental Physics. Chicago: Univ. of Chicago Press, 1996.]
90. Duan H., Fuller G.M., Qian Y.-Z. Collective neutrino flavor transformation in supernovae // *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 2010. Vol. 60. P. 569–594.
91. Itoh N., Hayashi H., Nishikawa A., Kohyama Y. Neutrino energy loss in stellar plasmas. V. Radiative plasma neutrino process // *Astrophys. J. Suppl.* 1996. Vol. 102. P. 411–422.
92. Яковлев Д.Г., Петик К.Дж. Охлаждение нейтронных звёзд // *УФН*. 2005. Т. 175. С. 123–142. [Англ. ориг.: Yakovlev D.G., Pethick C.J. Neutron star cooling // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 2004. Vol. 42. P. 169–210.]
93. Friman B.L., Maxwell O.V. Neutron star cooling by neutrino emission from the nucleon quasiparticle // *Astrophys. J.* 1979. Vol. 232. P. 541–548.
94. Yee S.H. et al. Tidal dissipation in WASP-12b // *Astrophys. J. Lett.* 2020. Vol. 888. L5.
95. Watson A.J., Lovelock J.E. Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld // *Tellus B*. 1983. Vol. 35. P. 284–289.
96. Lenton T.M. Gaia and natural selection // *Nature*. 1998. Vol. 394. P. 439–447.
97. Lenton T.M., Latour B. Gaia 2.0: could humans add some level of self-awareness to Earth's self-regulation? // *Science*. 2018. Vol. 361. P. 1066–1068.
98. Schwartzman D.W., Volk T. Biotic enhancement of weathering and the habitability of Earth // *Nature*. 1989. Vol. 340. P. 457–460.

99. Kirchner J.W. The Gaia hypothesis: fact, theory, and wishful thinking // *Clim. Change*. 2002. Vol. 52. P. 391–408.
100. Tyrrell T. *On Gaia: A Critical Investigation of the Relationship between Life and Earth*. Princeton: Princeton Univ. Press, 2013.
101. Doolittle W.F. Making evolutionary sense of Gaia // *J. Theor. Biol.* 2017. Vol. 433. P. 85–90.
102. Vazza F., Feletti A. The quantitative comparison between the neuronal network and the cosmic web // *Front. Phys.* 2020. Vol. 8. P. 317.
103. Krioukov D., Papadopoulos M., Kitsak M., Vahdat A., Boguñá M. Network cosmology // *Sci. Rep.* 2012. Vol. 2. P. 793.