

# David Kirtley: Nuclear Fusion, Plasma Physics, and the Future of Energy | Lex Fridman Podcast #485

Lex Fridman · 2025-11-17 · [https://www.youtube.com/watch?v=m\\_CFCyc2Shs](https://www.youtube.com/watch?v=m_CFCyc2Shs)



Участники: Лекс Фридман и Дэвид Кертли, инженер-ядерщик и CEO компании Helion Energy. Выпуск посвящен фундаментальной физике и инженерным вызовам управляемого термоядерного синтеза, а также нестандартному подходу Helion к созданию коммерческого термоядерного генератора.

Главная мысль: Термоядерный синтез перестал быть исключительно научной проблемой и перешел в стадию инженерной и производственной реализации. Использование импульсных магнитных систем (FRC) и прямого преобразования энергии позволяет создавать компактные, безопасные и экономически эффективные генераторы. Эта технология способна обеспечить человечество (и будущие ИИ-вычисления) практически безграничной чистой энергией уже в ближайшее десятилетие, радикально изменив геополитику и открыв путь к освоению дальнего космоса.

[00:00-03:18] смолток, реклама спонсоров и введение в тему выпуска.

## Физика ядерного синтеза и распада

**Механизмы извлечения энергии 03:18:** Синтез и распад — противоположные процессы извлечения энергии из массы. Синтез объединяет легкие элементы (водород, гелий) в более тяжелые, а распад дробит самые тяжелые и нестабильные элементы (уран, плутоний). Границей между этими процессами в периодической таблице служит железо: элементы легче железа выделяют энергию при слиянии, а тяжелее — при делении. В обоих случаях конечная

масса продуктов чуть меньше суммы исходных частей, и этот дефект массы высвобождается в виде колоссальной энергии согласно формуле Эйнштейна  $E=mc^2$ .

**Доступность топлива 09:24:** Топливо для распада ограничено, а для синтеза — практически бесконечно. Уран и плутоний образовались в ранней Вселенной при взрывах сверхновых, их запасы на Земле конечны и требуют сложной добычи и обогащения. Основное топливо для синтеза — дейтерий (тяжелый изотоп водорода с одним протоном и одним нейтроном) — содержится в любой воде на планете (тяжелая вода D<sub>2</sub>O). При текущем уровне энергопотребления человечества запасов дейтерия в мировом океане хватит на срок от 100 миллионов до 1 миллиарда лет.

**Фактчек: Дейтерия в океане хватит на 100 млн - 1 млрд лет** — □: Порядок верный и даже занижен:  $\sim 4 \cdot 10^{13}$  т дейтерия при текущем потреблении обеспечивают миллиарды лет (Gemini приводит оценку  $\sim 30$  млрд лет — дольше жизни Солнца).

**Преодоление кулоновского барьера 13:18:** Для запуска синтеза необходимо преодолеть электромагнитное отталкивание ядер. Положительно заряженные ядра отталкиваются друг от друга. Чтобы они сблизилась на расстояние действия сильного ядерного взаимодействия (масштаб самого атомного ядра), топливо необходимо нагреть до температур свыше 100 миллионов градусов Цельсия. Температура в данном случае означает кинетическую энергию: частицы должны двигаться с огромной скоростью, чтобы «пробить» электромагнитный барьер и слиться воедино.

**Фундаментальная разница в поддержании реакции 15:22:** Синтез требует экстремальных усилий для поддержания, в отличие от распада. Реакция деления происходит при комнатной температуре: достаточно добавить один нейтрон к нестабильному ядру урана, чтобы запустить самоподдерживающуюся цепную реакцию. Синтез же невозможен без колоссального давления и температуры. В Солнце удержание плазмы обеспечивается гравитацией огромной массы звезды, а на Земле для этого приходится использовать мощные электромагнитные поля. Термин «реактор» некорректен для синтеза: это скорее «генератор», который мгновенно глохнет при прекращении подачи топлива.

## **Безопасность, отходы и геополитика**

**Пассивная безопасность термоядерных установок 18:36:** Термоядерный генератор обладает абсолютной пассивной безопасностью. В любой момент времени внутри системы находится объем топлива, достаточный лишь для одной секунды работы. Если в установку врежется метеорит или произойдет любая другая катастрофа, реакция просто мгновенно прекратится, а дейтерий безопасно растворится в окружающей среде. В отличие от реакторов деления,

где в активной зоне хранятся запасы топлива на несколько лет, термоядерная установка физически не способна к неконтролируемому расплавлению.

**Невозможность создания оружия 25:30:** Термоядерные электростанции невозможно использовать для создания ядерного оружия. В них полностью отсутствует делящийся материал (уран или плутоний). Даже водородная бомба (H-bomb) на 90% получает энергию от первичного уранового заряда, который запускает вторичную реакцию синтеза. Эксперты по нераспространению ядерного оружия активно поддерживают скорейшее внедрение термоядерной энергетики, так как это снизит мировую потребность в обогащении урана и центрифугах, тем самым уменьшая геополитические риски.

**Фактчек: Водородная бомба получает ~90% энергии от первичного уранового заряда** — □: В схеме Теллера-Улама первичка даёт малую долю; основной выход — синтез во вторичке плюс деление урановой оболочки (в «грязных» конструкциях 50–80%). Универсального «90%» нет. Смысл «без делящегося материала бомбу не собрать» верен, цифра — нет.

**Фактчек: Термоядерные станции невозможно использовать для оружия** — △: Нейтронный поток теоретически позволяет нарабатывать плутоний и тритий; специалисты по нераспространению (Глейзер, Голдстон) обсуждают это как риск, а не только как плюс. Расхождение: Claude ставит △, GPT — □; риски ниже, чем у деления, но не нулевые.

**Разрушение энергетических монополий 31:10:** Повсеместное внедрение синтеза радикально изменит геополитику. Поскольку дейтерий добывается из обычной морской воды, ни одна страна не сможет монополизировать поставки топлива, перекрывать трубопроводы или использовать энергию как инструмент давления. Доступ к базовой чистой энергии станет независимым от географического положения государства.

**Регулирование и радиационные отходы 35:29:** Отходы термоядерного синтеза требуют экранирования, но не создают долгоживущей радиации. В процессе реакции выделяются рентгеновские лучи и нейтроны. Нейтроны вызывают активацию материалов конструкции, поэтому во время работы генератор окружают бетонными и пластиковыми (борированный полиэтилен) щитами. После выключения установки генерация радиации полностью прекращается. Благодаря закону ADVANCE Act, в США термоядерные установки регулируются по правилам Part 30 (как медицинские ускорители частиц и рентгеновские аппараты), а не по Part 50 (как традиционные АЭС).

**Фактчек: Термоядерные установки в США регулируются по Part 30 (как рентген), а не Part 50 (как АЭС)** — □: NRC приняла такое решение в апреле 2023, ADVANCE Act 2024 закрепил его законом. Gemini и Claude подтверждают независимо.

**Фактчек: Абсолютная пассивная безопасность; после выключения радиация полностью прекращается** — △: Неконтролируемого расплавления действительно

быть не может — это верно. Но активированные нейтронами материалы продолжают излучать после остановки, а побочные D-D реакции дают нейтроны и тритий, так что «топливо безопасно растворяется» и «нет долгоживущих отходов» — преувеличение. GPT оценивает жёстче (□).

## Подходы к удержанию плазмы: Токамаки, лазеры и FRC

**Инерциальный и магнитный синтез 38:46:** Существует два классических подхода к синтезу. Инерциальный синтез (например, в National Ignition Facility) использует мощные лазеры для мгновенного сжатия мишени на наносекунды. Магнитный синтез (токамаки и стеллараторы, такие как Wendelstein 7-X) пытается удерживать плазму низкой плотности как можно дольше с помощью сложных внешних магнитных катушек. В магнитных системах заряженные частицы «намагничиваются» — захватываются силовыми линиями и вращаются вокруг них по гироорбитам размером в несколько дюймов.

**Эволюция линейных систем 48:16:** Исторически первые попытки удержания плазмы делались в линейных трубах (тета-пинч), но плазма быстро утекала через открытые концы. Попытки закрыть концы магнитными «зеркалами» провалились: самые горячие частицы все равно вырывались наружу. Токамаки решили эту проблему, свернув трубу в бублик. Однако линейные системы обладают огромным потенциалом для быстрого сжатия плазмы, если решить проблему утечки с торцов. Helion использует гибридный метод — магнито-инерциальный синтез в линейной топологии.

**Фактчек: 50 МВт синтеза на 1 акре против 2000 акров солнечных панелей — ▲:**  
С учётом коэффициента использования ~25% для средних 50 МВт солнцу нужно ~1000–1500 акров. Завышено, порядок близкий.

**Обращенная магнитная конфигурация (FRC) 54:05:** FRC позволяет плазме удерживать саму себя. Если в линейной установке резко (за миллионную долю секунды) изменить направление внешнего магнитного поля, плазма не успевает перестроиться. В результате внутри плазмы индуцируется мощный электрический ток. Этот внутренний ток генерирует собственное магнитное поле, которое замыкается само на себя, образуя внутри трубы изолированный плазменный «бублик» (плазмод). Подобное явление самоорганизации плазмы регулярно наблюдается в природе в виде солнечных вспышек.

**Параметр плазменной беты 1:01:41:** FRC обладает экстремально высоким параметром «плазменной беты» ( $\beta \approx 1$ ). Бета — это отношение давления частиц плазмы к давлению удерживающего магнитного поля. В токамаках бета низкая (плазма жестко контролируется внешними магнитами). В FRC давление плазмы равно давлению магнитного поля. При сжатии внешним полем плазма активно сопротивляется. Уравнение магнитного давления ( $B^2/2\mu_0$ ) приравнивается к

давлению идеального газа ( $nkT$ ). Следовательно, зная внешнее магнитное поле, можно точно контролировать плотность и температуру топлива.

**Стабилизация плазмоида ( $S^* / E$ ) 1:06:26:** Главная проблема FRC — неустойчивость, которая решается кинетическим вращением. Плазмоид с  $\beta=1$  стремится перевернуться (tilt instability), так как внутри него нет физической оси. Решение описывается параметром  $S^*/E$ . Подобно детскому волчку, который падает в покое, но стоит ровно при быстром вращении, плазмоид остается стабильным, если придать ионам высокую кинетическую энергию ( $S^*$ ). Дополнительную стабильность дает удлиненная форма плазмоида (параметр  $E$  — elongation), подобно вращающемуся рулону скотча по сравнению с тонкой монетой. Если нагреть плазму достаточно быстро, она стабилизируется и живет тысячи микросекунд вместо расчетных единиц.

## Инженерия экстремальных скоростей и температур

**Физика 100 миллионов градусов 1:11:43:** Температура в 100 миллионов градусов — это мера скорости частиц. При нагреве до 10 000 градусов материя переходит в состояние плазмы, где электроны отрываются от ядер. При дальнейшем нагреве понятие температуры как хаотичного теплового движения сменяется направленной скоростью: частицы движутся со скоростью около 1 миллиона миль в час (100 км/с или метры в микросекунду). При таких скоростях плазма не должна касаться стенок реактора, иначе она мгновенно разрушит материал и охладится, поэтому ее удерживают исключительно магнитным полем.

**Фактчек: При 100 млн градусов частицы движутся ~1 млн миль/ч = 100 км/с —**  
□: 1 млн миль/ч  $\approx$  447 км/с, а тепловая скорость дейтронов при 10 кэВ — порядка 1000 км/с. Температура по-прежнему описывает хаотическое движение, а не «направленную скорость»; синтез при этих энергиях идет во многом через квантовое туннелирование, а не классическое «пробивание» барьера.

**Управление гигантскими токами 1:16:58:** Управление реакцией требует коммутации гигантских токов за наносекунды. В установках Helion циркулируют токи до 100 миллионов ампер. Поскольку самые мощные транзисторы выдерживают лишь 30 000 ампер, используются десятки тысяч параллельных ключей. Система должна переключить магнитное поле за 1 микросекунду — быстрее, чем горячая плазма успеет разлететься.

**Оптоволоконная диагностика 1:19:32:** Для синхронизации десятков тысяч переключателей используются оптоволоконные кабели. Медные провода слишком медленны для таких задач. Каждый ключ оснащен катушкой Роговского, которая питается от самого проходящего тока и отправляет световой сигнал о своем срабатывании. Логика управления прописывается на

уровне ассемблера для FPGA-матриц, что позволяет системе в реальном времени отслеживать корректность работы каждого транзистора.

**Многоуровневое моделирование 1:23:12:** Разработка опирается на сложное компьютерное моделирование. Используются магнитогидродинамические (MHD) коды, объединяющие гидродинамику с уравнениями Максвелла. На этом уровне симулируется вся электрическая цепь (SPICE-модели) и поведение плазмы как жидкости. Для изучения стабильности ( $S^*/E$ ) применяются гибридные PIC-коды (Particle-in-Cell), где ионы просчитываются как отдельные частицы. Эти вычисления требуют огромных мощностей GPU. В будущем планируется внедрение ИИ и обучения с подкреплением для анализа данных в реальном времени, чтобы заменить долгие циклы симуляций между запусками.

### Прямое преобразование энергии и топливо Гелий-3

**Масштабирование мощности 1:28:34:** Выход энергии масштабируется пропорционально магнитному полю в степени 3.77. В импульсных системах можно достичь магнитных полей свыше 100 Тесла (в стационарных токамаках предел около 20-30 Тесла). Увеличение поля одновременно повышает и плотность, и температуру плазмы. Благодаря степенной зависимости ( $B^{3.77}$ ), даже небольшое увеличение мощности магнитов приводит к колоссальному росту количества термоядерных реакций. Жизненный цикл плазмоида длится от 100 микросекунд до нескольких миллисекунд.

**Паровой цикл токамаков 1:35:29:** Традиционный магнитный синтез работает по принципу костра. В токамаках реакция дейтерия и трития (D-T) выделяет гелий (остается в плазме) и нейтроны, которые покидают магнитное поле и греют стенки реактора. Это тепло используется для кипячения воды и вращения классических паровых турбин. КПД такого преобразования тепловой энергии в электрическую составляет всего 30-35%.

**Прямое преобразование энергии Helion 1:38:08:** Импульсный синтез работает как двигатель внутреннего сгорания. Расширяющаяся от нагрева плазма (благодаря высокому параметру бета) давит обратно на магнитное поле. Это индуцирует ток в катушках, заряжая конденсаторы напрямую. Такой подход позволяет рекуперировать 95% энергии, затраченной на запуск реакции, и собирать новую энергию синтеза в виде электричества с КПД до 80-85%, минуя неэффективный паровой цикл.

**Фактчек: Прямое преобразование: рекуперация 95%, КПД 80-85%** —  $\triangle$ : Все трое сходятся — это расчётные цели Helion, экспериментально не показано; ни одна установка компании не выдала нетто-электричество. Исторические опыты с магнитным сжатием давали ~60%, а рекуперация 95% вложенной энергии сама по себе ещё не энергетическая прибыль. Именно Polaris должен это доказать.

**Топливо Дейтерий + Гелий-3 1:41:21:** Идеальное топливо для прямого преобразования — смесь дейтерия и гелия-3 (D-He3). При их слиянии образуются не нейтроны, а протоны (положительно заряженные ядра водорода). Протоны остаются запертыми в магнитном поле и участвуют в расширении плазмы, отдавая энергию напрямую в электрическую цепь.

**Компромиссы Гелия-3 1:43:28:** Использование Гелия-3 имеет свою цену. Во-первых, он редок на Земле. Во-вторых, реакция требует нагрева до 200-300 миллионов градусов (вместо 100 млн для D-T). При повышении температуры падает плотность (согласно уравнению  $B^2 = nkT$ ), что требует увеличения физических размеров реактора для сохранения того же количества реакций. Однако высочайший КПД прямого преобразования (80% против 30%) полностью компенсирует эти недостатки, позволяя строить установки аналогичного размера, но с гораздо большей эффективностью.

**Фактчек: D-He3 требует 200-300 млн градусов** —  $\square$ : Реакция действительно требует значительно больших энергий, чем D-T; оптимум ещё выше ( $\sim 50$  кэВ  $\approx 580$  млн  $^{\circ}\text{C}$ ), но заметный выход в импульсных системах начинается в заявленном диапазоне.

## Философия разработки, прототипы и производство

**Фундаментальная стоимость энергии 1:45:35:** Стоимость энергии фундаментально упирается в массу материалов электростанции. Чем меньше бетона, стали и меди требуется для постройки генератора, тем дешевле будет электричество. Helion делает ставку на компактные системы, которые можно производить серийно. Вместо создания одного гигантского магнита сложной формы, компания собирает установки из сотен небольших стандартных магнитов, которые легко производятся на обычных ЧПУ-станках и переносятся вручную.

**Стратегия быстрых итераций 1:48:25:** Быстрая итерация малых форм эффективнее мегапроектов. Helion построила уже 7 поколений прототипов (IPA, Venti, Grande, Trenta, Polaris). Шестой прототип (Trenta, 2020 год) впервые достиг 100 млн градусов и осуществил массовый синтез дейтерия и гелия-3. Седьмой (Polaris) строится сейчас. Стратегия компании — строить минимально возможные по размеру установки, доказывающие физику, и делать это максимально быстро. Это позволяет проверять гипотезы за месяцы, а не за десятилетия.

**Фактчек: Trenta достигла 100 млн  $^{\circ}\text{C}$  в 2020; Polaris «строится сейчас»** —  $\triangle$ : Рубеж 9 кэВ Helion объявила в июне 2021. Polaris достроен в декабре 2024 и работает с 2025; первая коммерческая станция Orion (Малага, Вашингтон) заложена летом 2025. Пересказ устарел.

**Прагматичный подход к снабжению (eBay) 1:54:45:** Скорость разработки обеспечивается нестандартным подходом к снабжению. Если заказ нового

турбомолекулярного вакуумного насоса у производителя занимает 9 месяцев, инженеры Helion скупают подержанные насосы на eBay. Даже если из нескольких купленных заработает только один, деталь оказывается в лаборатории за две недели.

**Выбор "достаточно хороших" решений 1:58:30:** Компания сознательно выбирает скорость вместо идеальной точности там, где это безопасно. Например, инженеры предпочитают использовать датчики плазмы с погрешностью 5%, которые можно собрать за месяц, вместо идеальных систем с погрешностью 3%, требующих лет разработки и миллионов долларов. Главный критерий — решение должно работать и позволять двигаться дальше.

**Вертикальная интеграция и культура строителей 2:00:06:** Helion — это компания строителей с глубокой вертикальной интеграцией. Половина из 500 сотрудников — это техники и машинисты, а не ученые-теоретики. Чтобы не зависеть от подрядчиков, компания разворачивает собственные производственные линии. У них работает конвейер для массовой сборки силовых конденсаторов и цеха для обработки нестандартных деталей из стеклотекстолита (G10). Все процессы заточены на то, чтобы срезать углы в логистике и бюрократии, не жертвуя качеством.

## Коммерциализация, ИИ и масштабирование

**Контракт с Microsoft 2:02:42:** В 2023 году Helion заключила контракт с Microsoft на поставку термоядерной энергии к 2028 году. Это жесткий дедлайн для запуска первой коммерческой электростанции, которая будет подключена к электросети для питания дата-центров. Компания уже два года занимается вопросами лицензирования, выбора площадки и подключения к энергосети. Установка будет выдавать импульсы с частотой от 1 до 10 герц, что позволяет гибко регулировать выходную мощность под нужды сети.

**Фактчек: Контракт с Microsoft на 50 МВт к 2028 году** — ☐: Контракт реален (май 2023), но срок — обязательство компании, а не свидетельство готовности технологии. Ни один термоядерный проект в мире ещё не давал электричество в сеть; большинство плазмистов считают дедлайн крайне оптимистичным, штрафные условия не раскрыты.

**Синтез для ИИ-дата-центров 2:12:19:** Термоядерный синтез идеально подходит для питания ИИ-дата-центров. Вычислительные кластеры требуют колоссальных объемов энергии в одной локации. Поскольку генераторы Helion выдают постоянный ток (DC) напрямую с конденсаторов, рассматривается возможность прямого питания GPU без потерь на конвертацию в переменный ток (AC) и обратно. Ожидается, что развитие ИИ поднимет ежегодный рост мирового энергопотребления с исторических 2% до 4-6% и выше, и синтез — единственный способ покрыть этот дефицит.

**Фактчек: Синтез — единственный способ покрыть энергодефицит ИИ; рост мирового энергопотребления с 2% до 4-6% —** □: «Единственный» ничем не обосновано — спрос закрывают атом (в т.ч. SMR), газ, ВИЭ, накопители и сети. По росту 4-6% рецензенты расходятся: Claude считает оценку реалистичной, GPT — прогнозом без расчёта, смешивающим электроэнергию и энергию в целом.

**Гигафабрики термоядерных генераторов 2:15:33:** Конечная цель — конвейерное производство генераторов. Построить одну работающую установку недостаточно. Helion проектирует цепочки поставок для будущих «гигафабрик», с конвейеров которых ежедневно будет сходить готовый 50-мегаваттный генератор размером с транспортный контейнер. Дата-центры упрощают логистику развертывания: вместо поиска сотен разных площадок можно установить 100 генераторов на одной территории прямо рядом с вычислительным кластером.

## **Космос, шкала Кардашева и будущее человечества**

**Переход к I типу по шкале Кардашева 2:19:50:** Термоядерная энергия способна перевести человечество на I тип по шкале Кардашева. Установка на 50 МВт занимает всего около 1 акра (в здании площадью 27 000 кв. футов), тогда как солнечным панелям для той же мощности потребовалось бы 2000 акров. Такая плотность энергии позволит радикально изменить инфраструктуру Земли: например, перенести сельское хозяйство в 500-футовые вертикальные фермы, освободив огромные территории для восстановления дикой природы, и обеспечить массовое опреснение воды.

**Двигатели для дальнего космоса 2:25:18:** Синтез — ключевая технология для освоения дальнего космоса. Солнечная энергия падает пропорционально квадрату расстояния, поэтому для полетов за пределы орбиты Земли источник энергии нужно брать с собой. В космосе некуда сбрасывать тепло (нет воды или воздуха для радиаторов), поэтому традиционные паровые турбины там неприменимы. Прямое преобразование энергии в электричество, разрабатываемое Helion, решает проблему отвода тепла, позволяя эффективно питать плазменные двигатели кораблей.

**Фактчек: В космосе некуда сбрасывать тепло, прямое преобразование решает проблему —** □: Радиаторы отводят тепло излучением без воды и воздуха. Прямое преобразование снижает отходящее тепло, но не устраняет: при КПД 85% от 100 МВт остаётся отвести 15 МВт, плюс всё потреблённое бортовыми системами электричество тоже становится теплом.

**Парадокс Ферми и «Мозги-матрешки» 2:28:25:** Дэвид Кертли предлагает оптимистичное объяснение парадокса Ферми через концепцию «мозгов-матрешек» (Matrioshka brains). Высокоразвитые цивилизации не стремятся к физической экспансии и колонизации тысяч планет. Вместо этого они строят

сферы Дайсона вокруг звезд, вся энергия которых направлена на питание колоссальных вычислительных систем. Цивилизации расширяются не в пространстве, а в сфере когнитивных способностей и интеллекта, становясь незаметными для внешних наблюдателей.

[2:34:22-2:36:54] философские размышления о красоте физики, идеальном балансе сил в природе и завершение подкаста.

## ЛИЧНО ДЛЯ ТЕБЯ

**Принцип «5% за месяц вместо 3% за годы»:** Там, где ошибка не фатальна, скорость итерации бьёт точность — б/у насосы с eBay за две недели вместо 9 месяцев ожидания, 7 поколений прототипов вместо одного идеального. Проверка: платить за лишние два процентных пункта точности только когда они реально меняют решение. Работает и для стройки, и для выбора добавок, и для любого продукта.

**Потолок ИИ — мегаватты, а не алгоритмы, но синтез это не решит в ближайшие 5-10 лет:** Рост дата-центров упирается в подключение к сети, охлаждение и цену мощности. Если думать об инвестициях или прогнозах стоимости инференса — ставка на газ, атом и сети; Helion — высокорисковая история, не базовый сценарий.

**Не жди дешёвой энергии — считай дом по сегодняшним кипрским тарифам:** Тепловой насос, панели, накопитель, утепление и затенение оценивать сейчас; даже успех синтеза не гарантирует дешёвую розничную электроэнергию в обозримом горизонте.

**Что реально стоит взять из выпуска — физика FRC (54:05-1:41):** Красивый пример, когда одно уравнение  $B^2/2\mu_0 = nkT$  при  $\beta \approx 1$  даёт полный контроль над плотностью и температурой через внешнее поле. Плюс «мозги-матрёшки» как оптимистичный ответ на парадокс Ферми: экспансия не в пространство, а в плотность интеллекта — любопытный контраст с логикой 4X-стратегий.

## КОНСЕНСУС РЕЦЕНЗЕНТОВ

Все трое сошлись: базовая физика и регуляторика (дейтерий, Part 30, контракт с Microsoft) верны, а КПД 80–85%, «абсолютная безопасность» и срок 2028 — недоказанные заявления компании; принцип «достаточно хорошего» — главная практическая ценность выпуска. Разошлись в жёсткости: Gemini в целом благосклонен и не проверял оружейный и радиационный тезисы, Claude и GPT нашли фактические ошибки (90% в H-бомбе, 100 км/с, тепло в космосе) и спорят о реалистичности прогноза роста энергопотребления 4–6%.