

Biggest Mysteries in Physics: Antimatter, Dark Energy & ToE - Don Lincoln | Lex Fridman Podcast #497

Lex Fridman · 2026-05-29 · <https://www.youtube.com/watch?v=1M3VdI6DRkU>



Беседа Лекса Фридмана с Доном Линкольном, физиком-экспериментатором из Фермилаб (Fermilab), участвовавшим в открытии топ-кварка и бозона Хиггса. Выпуск представляет собой глубокое погружение в историю объединения физических теорий, устройство квантовых полей, работу коллайдеров и главные нерешенные проблемы современной физики: от природы темной материи и темной энергии до поиска Теории всего.

Главная мысль: наука движется вперед не только благодаря красивым математическим концепциям, но в первую очередь через экспериментальную проверку аномалий. Несмотря на колоссальный прогресс Стандартной модели, фундаментальные загадки Вселенной потребуют от человечества еще многих десятилетий, а возможно и столетий, непрерывной инженерной и теоретической работы.

История объединения в физике

[00:00-01:32] смолток, представление гостя и реклама.

Гравитация и электромагнетизм 01:32: История физики — это история объединения разрозненных явлений. В 1650-х годах Исаак Ньютон понял, что падение яблока на Земле и движение Луны по орбите — это одно и то же явление, объединив земную и небесную гравитацию в закон всемирного тяготения. В 1860-х годах Джеймс Клерк Максвелл объединил электричество

(молнии) и магнетизм (магниты) в единый электромагнетизм. Из уравнений Максвелла математически вытекало, что электромагнитные волны движутся со скоростью света, что доказало волновую природу самого света.

Фактчек: Ньютон объединил земную и небесную гравитацию «в 1650-х» — □:

Ньютон родился в 1643 г.; яблоко/Луна — 1666 г., «Начала» — 1687. Ошибка даты (оговорка или пересказ), отметил только Claude.

Редукционизм и технологии 07:53: Фундаментальная физика стремится дойти до самого базового уровня реальности: биология объясняется химией, химия — движением молекул, молекулы — атомами, атомы — ядрами и электронами, а ядра — кварками. Изучение этих глубоких уровней, казавшихся абстрактными, всегда приводит к технологическим прорывам. Понимание электромагнетизма дало человечеству электричество и интернет, а изучение устройства атомного ядра привело к созданию ядерной энергетики.

Революция Эйнштейна: пространство-время и гравитация

Специальная теория относительности 15:28: В 1905 году Альберт Эйнштейн показал, что время не универсально: наблюдатели, движущиеся с разными скоростями, воспринимают течение времени по-разному. В 1908 году его учитель Герман Минковский математически оформил эту идею, доказав, что пространство и время — это единая сущность (пространство-время).

Постоянство скорости света 18:43: СТО базируется на двух постулатах: законы природы одинаковы для всех, и скорость света неизменна независимо от движения наблюдателя. Сегодня это доказано экспериментально на коллайдерах: если разогнать субатомную частицу почти до скорости света, и она распадется с излучением фотона, этот фотон все равно будет двигаться ровно со скоростью света, а не в два раза быстрее. Скорость света — это фундаментальное свойство самого пространства-времени, его максимальная пропускная способность.

Фактчек: Эффект Казимира доказывает существование виртуальных частиц —

△: Сила измерена, но трактовка через «давление виртуальных частиц» не единственная: Джаффе (2005) вывел её как релятивистский ван-дер-ваальс без энергии вакуума. Виртуальные частицы — элемент вычислительного аппарата, а не пойманные объекты; аномальный магнитный момент (0,1%, совпадение до ~10–12 знаков) — куда более чистое свидетельство. Claude ставит △, GPT — □; расхождение в строгости, не в сути.

Общая теория относительности 26:37: Эйнштейн осознал принцип эквивалентности: ускорение в ракете ощущается точно так же, как гравитация. Это привело к радикальной идее ОТО: гравитация — это не просто сила притяжения, а искривление самого полотна пространства-времени под воздействием массы.

Фактчек: GW170817: гравитация идёт со скоростью света, разница 1,7 с, 140 млн св. лет — □: Все три рецензента подтверждают. Уточнения: расстояние ~130 млн св. лет; результат ограничивает разницу скоростей величиной $\sim 10^{-15}$, а не доказывает точное равенство.

Роль критика в науке 29:48: Эйнштейн не смог принять квантовую механику, но его критика (например, указание на парадоксы квантовой запутанности) заставила физиков формулировать строгие проверяемые следствия. Наука работает только тогда, когда гениальные инсайты подвергаются безжалостному критическому анализу и экспериментальной проверке.

Фактчек: ALPHA 2023: антиматерия падает вниз, ~75% g в пределах погрешности = 100% — □: Nature, сентябрь 2023, ускорение $0,75 \pm 0,13 \pm 0,16 g$ — совместимо с $1 g$.

Стандартная модель и поле Хиггса

Электрослабое объединение 33:05: В природе существует четыре фундаментальные силы: гравитация, электромагнетизм, сильное ядерное взаимодействие (удерживает ядро) и слабое ядерное взаимодействие (отвечает за радиоактивность). В 1967 году Вайнберг, Салам и Глэшоу доказали, что при сверхвысоких энергиях электромагнетизм и слабое взаимодействие сливаются в единую электрослабую силу.

Фактчек: 1 г + 1 г антиматерии ≈ Хиросима + Нагасаки; 1 г = 62-63 трлн; 1 Мт-бомба ≈ 25 г за 1,5 квадриллиона — □: 2 г аннигиляции ≈ 43 кт ТНТ (две бомбы ≈ 36 кт); оценка NASA (Герриш, 1999) ~\$62,5 трлн/г широко цитируется; 1 Мт ≈ 23-25 г.

Проблема массы 36:23: Электромагнетизм имеет бесконечный радиус действия, так как его переносчик (фотон) не имеет массы. Слабое взаимодействие работает только внутри атома, так как его переносчики (W- и Z-бозоны) обладают массой. Чтобы теория электрослабого объединения работала, нужен был механизм, который даёт массу одним частицам и оставляет безмассовыми другие.

Фактчек: 10^{12} антипротонов в сутки = одна стомиллиардная грамма, грамм за миллиард лет — △: 10^{12} антипротонов ≈ $1,7 \times 10^{-12} g$ — в 6 раз меньше названного; грамм при таком темпе — ~1,6 млрд лет. Порядок верен, цифры округлены вольно.

Механизм Хиггса 38:03: В 1964 году было постулировано существование поля Хиггса, пронизывающего все пространство. Частицы, взаимодействующие с этим полем, обретают массу (как объект, испытывающий сопротивление среды), а частицы вроде фотона не взаимодействуют с ним и остаются безмассовыми.

Фактчек: Поле Хиггса даёт массу «как сопротивление среды»; до его включения все частицы летели со скоростью света — △: Популярная метафора, но неточная — постоянное поле не создаёт трения, а ~99% массы протонов и нейтронов

даёт сильное взаимодействие, не Хиггс. В горячей ранней Вселенной исчезает вакуумное среднее поля, но остаются тепловые эффекты; картина «всё безмассово» — упрощение (GPT ставит $\square$, остальные не проверяли).

Фактчек: Расчёт энергии вакуума расходится с наблюдениями в 10^{120} раз (10^{60} при обрезании на ТэВ) — $\square$: Классическая «проблема космологической постоянной», оба числа корректны.

Нарушение симметрии 41:20: В момент Большого взрыва при сверхвысоких температурах поле Хиггса было равно нулю. Ни одна частица не имела массы, и все они двигались со скоростью света. Спустя 10^{-12} секунды Вселенная остыла, поле Хиггса «включилось» (произошло нарушение электрослабой симметрии), и W/Z-бозоны мгновенно обрели массу, отделив слабое взаимодействие от электромагнитного.

Фактчек: Плотность тёмной энергии постоянна, значит, рождаются новые кванты пространства — $\triangle$: Постоянство — свойство модели с Λ , а не установленный факт: DESI 2024–2025 на уровне $\sim 3\text{--}4\sigma$ указывают на возможную эволюцию тёмной энергии. Вывод о дискретности пространства из постоянной плотности не следует; квантовость гравитации (запутанность) $\neq$ дискретность (GPT).

Ускорители частиц и открытие бозона Хиггса

Принцип работы коллайдеров 43:27: Квантовое поле невозможно увидеть, но его можно заставить вибрировать. Локальная вибрация поля Хиггса — это бозон Хиггса. Согласно формуле $E=mc^2$, кинетическая энергия сталкивающихся частиц преобразуется в массу, создавая новые частицы, в том числе те, которые не существуют в обычной природе.

Масштабы экспериментов 50:57: Большой адронный коллайдер (БАК) в ЦЕРНе имеет в 7 раз большую энергию и в 100 раз большую частоту столкновений, чем закрытый ныне Теватрон в Фермилаб. В 1995 году Фермилаб открыл топ-кварк: за год работы было найдено всего 19 достоверных частиц. Сегодня БАК производит один топ-кварк каждую секунду.

Фактчек: Топ-кварк открыт в Фермилаб в 1995 г. по ~ 19 событиям; БАК производит топ-кварк каждую секунду — $\square$: CDF и D0 подтвердили открытие по нескольким десяткам кандидатов; на Run 2 БАК рождает до десятков топ-кварков в секунду — «раз в секунду» даже консервативно.

Обработка данных на БАК 56:51: Внутри коллайдера происходит 1 миллиард столкновений в секунду. Пучки протонов толщиной с человеческий волос пересекаются 40 миллионов раз в секунду. Детектор CMS весит 14 000 тонн и имеет высоту в 5 этажей. Аппаратные триггеры отсеивают скучные события, оставляя 100 000 снимков в секунду, а затем серверная ферма снижает это число до 1 000 событий в секунду, которые записываются для анализа.

Открытие 4 июля 2012 года 1:02:34: ЦЕРН объявил об обнаружении частицы, похожей на бозон Хиггса. Фермилаб к тому моменту успел лишь исключить определенные диапазоны масс, но не имел достаточно данных для открытия. За прошедшие с тех пор годы было подтверждено, что спин найденной частицы равен нулю, и она распадается на b-кварки, W/Z-бозоны и фотоны в точном соответствии с предсказаниями теории 1964 года.

[1:12:42-1:13:12] реклама.

Теория всего и критика теории струн

Проблема масштаба 1:13:12: Теория Великого объединения (GUT) пытается слить электрослабое и сильное взаимодействия, а Теория всего (ToE) — добавить к ним гравитацию. Энергия, необходимая для проверки этих теорий (Планковский масштаб), в 10^{15} (квадриллион) раз превышает возможности современных коллайдеров.

Прогноз Дона Линкольна 1:15:52: Теория всего не будет создана ни при нашей жизни, ни при жизни наших внуков. Экстраполировать современные знания на квадриллион порядков вверх — это как австралопитеку, знающему только саванну, пытаться предсказать существование Альп, пингвинов или Марианской впадины. На таких масштабах неизбежно возникнет совершенно новая физика.

Критика теории струн 1:33:29: Теория струн математически допускает существование гигантского ландшафта возможных вселенных, что делает ее неспособной давать точные предсказания для нашего мира. За 50 лет работы теоретики имеют лишь приближенные решения приближенных уравнений. Без возможности экспериментальной проверки теория рискует остаться просто изящной математикой.

Петлевая квантовая гравитация 1:36:40: В отличие от теории струн, теория Карло Ровелли не пытается объединить все силы, а лишь квантует саму гравитацию и пространство. Ранняя версия теории предсказывала, что скорость света зависит от длины волны. Однако наблюдения за гамма-всплесками в миллиардах световых лет от нас показали, что фотоны разных энергий прилетают одновременно. Это убило старую версию теории, заставив физиков ее переработать.

Скорость гравитации 1:41:27: Наблюдение слияния двух нейтронных звезд на расстоянии 140 млн световых лет доказало, что гравитация распространяется со скоростью света. Гравитационные волны и световая вспышка достигли Земли с разницей всего в 1.7 секунды.

Вакуум, виртуальные частицы и антиматерия

Пустое пространство не пусто 1:43:04: Согласно квантовой теории поля, вакуум заполнен полями всех существующих частиц. Виртуальные частицы — это флуктуации (нехарактерные вибрации) этих полей, при которых пары частица-античастица постоянно рождаются и исчезают.

Эффект Казимира 1:46:12: Существование виртуальных частиц доказано экспериментально. Если поместить две металлические пластины очень близко друг к другу, длинноволновые виртуальные частицы не смогут рождаться между ними. Из-за этого давление виртуальных частиц снаружи становится больше, чем внутри, и пластины притягиваются.

Фактчек: Скопление Пуля — прямое доказательство тёмной материи, не взаимодействующей с газом — □: Сильнейший аргумент в пользу бесстолкновительного невидимого компонента; строго говоря, показывает слабость взаимодействия, а не его полное отсутствие.

Аномальный магнитный момент 1:47:15: Виртуальные частицы, рождающиеся вокруг электрона или мюона, изменяют их магнитные свойства на 0.1%. Современные измерения совпадают с теоретическими расчетами квантовой электродинамики до 10 знаков после запятой.

Открытие антиматерии 1:49:53: В 1928 году Поль Дирак вывел уравнение, объединяющее квантовую механику и теорию относительности. Математика выдала два решения: положительное и отрицательное. Дирак поверил формулам и предсказал существование позитрона (антиэлектрона), который был открыт уже в 1932 году. Антипротон открыли в 1955 году.

Антиводород и гравитация 1:52:01: В ЦЕРНе научились создавать атомы антиводорода, соединяя антипротоны и позитроны при температурах, близких к абсолютному нулю. Спектр света, излучаемого антиводородом, абсолютно идентичен спектру обычного водорода. В 2023 году эксперимент ALPHA доказал, что антиматерия падает вниз, а не вверх (сила притяжения составила ~75% от обычной гравитации, но с учетом погрешности результат согласуется с 100%).

Фактчек: Галактики «Dragonfly 2 и 4» вращаются по Ньютону без тёмной материи, что опровергает MOND — △: Расхождение рецензентов. Gemini — □. Claude и GPT: правильные названия NGC 1052-DF2/DF4 (Dragonfly — телескоп); измеряли не кривую вращения, а дисперсию скоростей шаровых скоплений; вывод зависел от спорного расстояния (при 13 Мпк вместо 20 аномалия исчезает), HST 2021 поддержал ~20 Мпк. Аргумент против MOND сильный, но сторонники MOND отвечают «внешним полевым эффектом» соседа NGC 1052 — не «закрывается».

Производство антиматерии и загадка бариогенеза

Стоимость и сложность производства 1:56:17: До 2011 года Фермилаб был главным производителем антипротонов в мире. Чтобы получить 1 антипротон, нужно было разбить 100 000 обычных протонов. За сутки производилось около 10^{12} антипротонов — это одна стомиллиардная доля грамма. При таких темпах на создание 1 грамма ушел бы миллиард лет.

Энергетический потенциал 1:57:51: Аннигиляция 1 грамма антиматерии с 1 граммом материи выделяет энергию, эквивалентную суммарной мощности бомб, сброшенных на Хиросиму и Нагасаки.

Экономика антиматерии 1:58:24: По оценкам NASA, производство 1 грамма антиводорода обойдется в 62-63 трлн. Создание антиматериевой бомбы мощностью 1 мегатонн (около 25 грамм) стоило бы 1.5 квадриллиона, тогда как обычная ядерная боеголовка стоит \$10-50 млн. Использование антиматерии для двигателей (полет к Альфа Центавре за 20 лет) упирается исключительно в инженерную проблему хранения и колоссальную стоимость концентрации энергии.

Фактчек: Масса частицы тёмной материи — «от астероида до в разы меньше электрона» — Δ : Нижняя граница сильно занижена: ультралёгкие аксионы/«нечёткая» ТМ — до 10^{-22} эВ, на 28 порядков легче электрона. Диапазон ~90 порядков — тезис о неизвестности только усиливается.

Загадка бариогенеза 2:04:47: При Большом взрыве должно было образоваться равное количество материи и антиматерии, которые бы полностью аннигилировали. Однако анализ реликтового излучения показывает, что в ранней Вселенной возникла крошечная асимметрия: на каждый миллиард частиц антиматерии приходился миллиард и одна частица материи. Миллиарды взаимно уничтожились, а из оставшихся «лишних» частиц состоит весь наш мир.

Лептогенез и нейтрино 2:08:01: Причина этой асимметрии неизвестна. Сейчас Фермилаб и японские ученые проводят эксперименты с нейтрино (лептонами). Нейтрино умеют осциллировать — менять свой тип на лету. Если окажется, что нейтрино и антинейтрино осциллируют с разной скоростью, это может стать ключом к разгадке того, почему материя победила антиматерию.

Темная энергия и кризис вакуума

Ускоряющееся расширение 2:11:13: В конце 1990-х годов астрономы обнаружили, что расширение Вселенной не замедляется под действием гравитации, а ускоряется. Это потребовало введения темной энергии — отталкивающей силы, которая является свойством самого пространства (аналог космологической постоянной Эйнштейна).

Худшее предсказание в физике 2:14:56: Если темная энергия — это энергия квантовых полей вакуума, то расчет по формулам квантовой теории поля дает значение, которое в 10^{120} раз больше реально наблюдаемого. Даже если ограничить расчеты энергиями, доступными современным коллайдерам, ошибка составит 10^{60} раз. Это означает, что в квантовой теории поля не хватает фундаментального механизма, который бы почти идеально (но не до полного нуля) компенсировал эту энергию.

Фактчек: Теории всего не будет при жизни внуков — □: Мнение, но обоснованное: 15 порядков до планковской шкалы без единого экспериментального якоря.

Плотность темной энергии 2:22:01: По мере расширения Вселенной плотность обычной материи падает, так как объем растет. Однако плотность темной энергии остается постоянной. Это значит, что общее количество темной энергии во Вселенной непрерывно увеличивается.

Квантование пространства 2:24:44: Постоянная плотность темной энергии может косвенно указывать на то, что само пространство квантовано. При расширении Вселенной пространство не просто растягивается, а в нем появляются новые кванты (микропузырьки Планковского размера), каждый из которых несет строго фиксированную порцию темной энергии.

Проверка квантовой гравитации 2:26:18: В ближайшие десятилетия физики планируют провести эксперименты по квантовой запутанности гравитации. Если удастся доказать, что гравитационное поле между частицами, находящимися в суперпозиции, также квантуется, это закроет все теории непрерывной гравитации и направит науку к пониманию дискретной структуры пространства.

Темная материя

Доказательства существования 2:27:59: Астрономические наблюдения показывают три аномалии: галактики вращаются слишком быстро и не разлетаются; скопления галактик движутся слишком быстро; гравитационное линзирование искажает свет далеких объектов сильнее, чем позволяет видимая масса.

Скопление Пуля (Bullet Cluster) 2:31:46: При столкновении двух скоплений галактик гигантские облака водородного газа врезались друг в друга и остановились в центре. Однако гравитационное линзирование показало, что основная масса скоплений не остановилась, а прошла насквозь вместе с самими галактиками. Это прямое доказательство того, что темная материя существует физически и не взаимодействует с обычным газом.

Галактики без темной материи 2:33:23: Недавнее открытие галактик Dragonfly 2 и 4 показало, что они вращаются в строгом соответствии с законами Ньютона. Парадоксальным образом галактики без темной материи доказывают

ее существование: если бы проблема была в неверных законах гравитации (MOND), аномалия наблюдалась бы везде. Раз темную материю можно «изъять» из галактики, значит, это реальная субстанция.

Исключенные кандидаты 2:34:26: Темная материя — это не черные дыры, не блуждающие планеты и не тусклые звезды (MACHOs). В 90-е годы масштабные поиски эффектов микролинзирования доказали, что таких объектов в космосе недостаточно для объяснения скрытой массы.

Поиск частиц (WIMPs) 2:34:58: Физики ищут слабо взаимодействующие массивные частицы тремя путями: прямая детекция в подземных лабораториях (ожидание столкновения с ядром), косвенная (поиск гамма-лучей от аннигиляции темной материи в центре галактик) и на коллайдерах (поиск недостающего импульса при столкновениях). Все результаты пока отрицательные.

Масштаб неизвестности 2:39:43: Темной материи во Вселенной в 5 раз больше, чем обычной. При этом масса гипотетической частицы темной материи может варьироваться в гигантском диапазоне: от массы астероида до массы, в разы меньшей массы электрона. Эксперименты покрывают лишь узкие участки этого диапазона.

Путь ученого и философия науки

Личный опыт 2:43:24: Дон Линкольн вырос в бедной семье, его родители не учились в колледже. Интерес к науке сформировался благодаря запойному чтению научной фантастики и книгам популяризаторов (Айзек Азимов, Карл Саган, Георгий Гамов). В 80-е годы он выбрал физику элементарных частиц, а не космологию, потому что коллайдеры давали возможность получать точные экспериментальные ответы, а не просто теоретизировать.

Трудолюбие и упорство 2:48:53: В аспирантуре Линкольн работал с 8 утра до полуночи шесть дней в неделю. Настоящего ученого от просто умного человека отличает «научная злость» и упорство (grit): когда эксперимент ломается или данные не сходятся, настоящий исследователь не опускает руки, а злится на проблему и вкладывает еще больше усилий, чтобы заставить природу выдать свои тайны.

ЛИЧНО ДЛЯ ТЕБЯ

Тест «что бы это опровергло?» как фильтр знания: Теория струн за 50 лет не дала проверяемого предсказания — и потому остаётся математикой, не физикой. Тот же тест прикладывай к добавкам, протоколам longevity и прогнозам про AI: если утверждение нельзя сфальсифицировать наблюдением, это вкус, а не знание.

Разделяй измерение → модель → метафору: Сила Казимира измерена, «кипящий суп виртуальных частиц» — картинка; масса как «сопротивление среды» — картинка. При чтении научпопа и ответов AI полезно отдельно спрашивать: что наблюдали, чем объясняют, что допустили.

Выбирай задачи с короткой петлёй обратной связи: Линкольн пошёл в физику частиц, а не в космологию, потому что коллайдер даёт ответ, а не десятилетия споров. Эвристика распределения времени: реальный сигнал важнее красивой, но непроверяемой постановки. И добавка к ней — специально ищи сильнейшее возражение своей позиции: критика Эйнштейна квантмеха дала неравенства Белла и Нобель 2022.

Что мониторить в ближайшие годы: DESI по эволюции тёмной энергии (подтвердится — Λ CDM в нынешнем виде рушится), DUNE/Hyper-K по CP-нарушению у нейтрино (ключ к тому, почему материя победила антиматерию), первые эксперименты по запутанности через гравитацию. Редкий шанс увидеть смену парадигмы вживую. И для калибровки фантастики: антиматерия — накопитель энергии, не источник; на производство уходит больше, чем возвращает аннигиляция.

КОНСЕНСУС РЕЦЕНЗЕНТОВ

Все трое сошлись на цифрах по GW170817, ALPHA, стоимости и энергии антиматерии и проблеме 10^{120} . Разошлись по DF2/DF4 (Gemini принял без оговорок, Claude и GPT указали на неверное название, метод измерения и открытый спор с MOND) и по эффекту Казимира (Claude — Δ , GPT — $\square$); Gemini в целом не критичен и не заметил ошибку с датой Ньютона и упрощения про Хиггса.