

Физика за пределами Стандартной модели

К 2012 году Стандартная модель (СМ) была теоретически завершена с подтверждением существования бозона Хиггса в Большом адронном коллайдере (LHC) в ЦЕРНе. Все предсказанные частицы были найдены. Ее уравнения с поразительной точностью выдерживали все экспериментальные проверки.

Тем не менее, в физике царила не атмосфера завершенности, а чувство незавершенности. Как законы Ньютона уступили место Эйнштейну, а классическая физика — квантовой механике, Стандартная модель была слишком успешной на тех масштабах, которые мы можем тестировать, но не способна ответить на более глубокие вопросы. Это была почти безупречная карта — но только небольшого участка ландшафта.

Гравитация: отсутствующая сила

Самое очевидное упущение — это гравитация.

- Стандартная модель описывает три из четырех известных фундаментальных взаимодействий: электромагнетизм, слабое взаимодействие и сильное взаимодействие.
- Гравитация, описанная **Общей теорией относительности (ОТО)** Эйнштейна, полностью отсутствует.

Это не просто мелкая недоработка. Общая теория относительности рассматривает гравитацию как искривление пространства-времени, гладкое геометрическое поле, тогда как Стандартная модель рассматривает силы как квантовые поля, опосредованные частицами. Попытки квантовать гравитацию тем же способом приводят к бесконечностям, которые невозможно нормализовать.

Стандартная модель и ОТО — это как две разные операционные системы: блестящие в своих областях, но принципиально несовместимые. Их примирение, возможно, является самой большой задачей современной физики.

Масса нейтрино

Стандартная модель предсказывает, что нейтрино не имеют массы. Но эксперименты, начиная с детектора Super-Kamiokande в Японии (1998) и подтвержденные по всему миру, показали, что нейтрино осциллируют между различными типами (электронным, мюонным, тау). Осцилляции требуют наличия массы.

Это было первое подтвержденное доказательство физики за пределами Стандартной модели. Эта находка принесла Кадзита и Макдональду Нобелевскую премию в 2015

году.

Нейтрино невероятно легкие, по крайней мере, в миллион раз легче электрона. Их масса не объясняется Стандартной моделью — но может указывать на новую физику, такую как **механизм качелей**, стерильные нейтрино или связи с ранней Вселенной. В некоторых сценариях тяжелые нейтрино качелей делают возможной **лептогенезу**, при которой в ранней Вселенной возникает асимметрия лептонов, которая позже превращается в наблюдаемую **асимметрию материи и антиматерии**.

Темная материя

Видимая материя, описанная Стандартной моделью, составляет менее 5% Вселенной. Остальное невидимо.

- **Темная материя** (~27% Вселенной) проявляется только через гравитацию: галактики вращаются быстрее, чем позволяет видимая материя, скопления галактик искривляют свет больше, чем ожидалось, а космический микроволновый фон требует дополнительной невидимой массы.
- Ни одна частица в Стандартной модели не может это объяснить. Нейтрино слишком легкие и быстрые. Обычная материя слишком редка.

Теории предлагают новые частицы: WIMP (слабо взаимодействующие массивные частицы), аксионы, стерильные нейтрино или что-то еще более экзотическое. Но несмотря на десятилетия поисков — подземные детекторы, эксперименты на коллайдерах, астрономические наблюдения — темная материя остается неуловимой.

Темная энергия

Еще более загадочна **темная энергия**, сила, которая управляет ускоренным расширением Вселенной.

- Обнаруженная в 1998 году через наблюдения сверхновых, темная энергия составляет около 68% Вселенной.
- Теоретически она может быть объяснена как “энергия вакуума” квантовых полей. Но простые расчеты в квантовой теории поля предсказывают плотность энергии вакуума, которая на 120 порядков слишком велика — худшее предсказание в физике.

Эта **проблема космологической постоянной**, возможно, является самым острым столкновением между квантовой теорией поля и гравитацией. Стандартная модель ничего не говорит о темной энергии. Это огромный пробел в нашем понимании космоса.

Проблема иерархии

Еще одна глубокая загадка кроется в самом бозоне Хиггса.

Измеренная масса Хиггса составляет 125 ГэВ. Но квантовые поправки должны поднять ее к планковскому масштабу (10^{19} ГэВ), если только не происходят чудесные вычитания. Почему она так мала по сравнению с естественными энергетическими масштабами гравитации?

Это **проблема иерархии**: Хиггс кажется неестественно тонко настроенным. Физики подозревают новую физику, такую как **суперсимметрия (SUSY)**, которая может стабилизировать массу Хиггса, вводя партнерские частицы, которые отменяют опасные поправки. (Обсуждения **естественности** включают идеи от динамических решений до **антропных** рассуждений в возможном “ландшафте” вакуумов.)

Асимметрия материи и антиматерии

Стандартная модель включает некоторое нарушение CP, но его слишком мало, чтобы объяснить, почему современная Вселенная полна материи, а не равными количествами материи и антиматерии. Как упомянуто выше, механизмы, такие как **лептогенез** (часто связанные с происхождением массы нейтрино через качели), предлагают убедительный путь, при котором физика за пределами Стандартной модели нарушает равновесие.

Красивая, но неполная картина

Стандартную модель иногда называют “самой успешной теорией в физике”. Ее предсказания соответствуют экспериментам с точностью до 10-12 знаков после запятой. Она объясняет почти все, что мы видим в ускорителях частиц и лабораториях.

Но она неполна:

- Она игнорирует гравитацию.
- Она не может объяснить массу нейтрино.
- Она не может объяснить темную материю или темную энергию.
- Она оставляет неразрешенными глубокие загадки, такие как проблема иерархии и асимметрия материи и антиматерии.

Физики сейчас сталкиваются с знакомым моментом в истории. Как ньютоновская механика уступила место теории относительности, а классическая физика — квантовой механике, Стандартная модель в конечном итоге должна уступить место чему-то более глубокому.

Святой Грааль: Единая теория

Конечная цель — **Великая объединенная теория (GUT)** или даже **Теория всего (ToE)**: структура, которая объединяет все четыре силы, объясняет все частицы и работает последовательно от самых малых масштабов (квантовая гравитация) до самых больших (космология).

Это Святой Грааль современной физики. Вот почему исследователи толкают ускорители к более высоким энергиям, строят огромные нейтринные детекторы, составляют

карты Вселенной с помощью телескопов и изобретают новую и смелую математику.

Следующие главы исследуют главных кандидатов:

- **Суперсимметрия (SUSY)** — симметрия между частицами материи и силами.
- **Теория струн и М-теория** — где частицы являются вибрирующими струнами, а гравитон возникает естественно.
- **Дополнительные измерения** — от ранней идеи Калуцы-Клейна до современных моделей Рэндалл-Сандрам.
- **Другие подходы** — такие как квантовая гравитация в петлях и асимптотическая безопасность.

Каждая из этих идей возникла не как догма, а как наука в лучшем виде: замечание трещин, построение новых теорий и их проверка на соответствие реальности.

Суперсимметрия: следующая большая симметрия?

Физика продвигалась через объединение посредством симметрии. Уравнения Максвелла объединили электричество и магнетизм. Специальная теория относительности объединила пространство и время. Электрослабая теория объединила две из четырех фундаментальных сил. Каждый скачок вперед проистекал из открытия скрытой симметрии в природе.

Суперсимметрия — или SUSY, как физики ласково ее называют — это смелое предложение, что следующая большая симметрия связывает две, казалось бы, разные категории: **материю** и **силы**.

Фермионы и бозоны: материя против силы

В Стандартной модели частицы делятся на две большие семьи:

- **Фермионы (спин 1/2):** включают кварки и лептоны, строительные блоки материи. Их полуцелый спин означает, что они подчиняются принципу запрета Паули: два идентичных фермиона не могут находиться в одном состоянии. Именно поэтому атомы имеют структурированные оболочки, а материя стабильна.
- **Бозоны (целый спин):** включают фотоны, глюоны, W- и Z-бозоны и Хиггс. Бозоны опосредуют силы. В отличие от фермионов, они могут накапливаться в одном состоянии, поэтому существуют лазеры (фотоны) и конденсаты Бозе-Эйнштейна.

Короче: фермионы формируют материю, бозоны переносят силы.

Гипотеза суперсимметрии

Суперсимметрия предлагает симметрию, которая связывает фермионы и бозоны. Для каждого известного фермиона существует бозонный партнер. Для каждого известного бозона — фермионный партнер.

- Кварки → **скварки**
- Лептоны → **слептоны**
- Глюоны → **глюино**
- Сектор калибровочных/Хиггсовых частиц → **нейтралино** (смесь бино, вино, хиггсино; нейтральные) и **чарджино** (смесь вино, хиггсино; заряженные)

(“Фотино” и “зино” — старые прозвища для конкретных калибровочных состояний; эксперименты на самом деле ищут **массовые состояния**, упомянутые выше.)

Почему предлагать такое радикальное удвоение мира частиц? Потому что SUSY предлагает элегантные решения некоторых из самых глубоких проблем, оставленных Стандартной моделью.

Решение проблемы иерархии

Одно из главных достоинств SUSY — это ее способность решать **проблему иерархии**: почему бозон Хиггса так легок по сравнению с планковским масштабом?

В Стандартной модели квантовые поправки от виртуальных частиц должны поднять массу Хиггса до огромных значений. Суперсимметрия вводит партнерские частицы, которые отменяют эти расхождения. Результат: масса Хиггса естественно стабилизируется без необходимости тонкой настройки (по крайней мере, в “естественных” спектрах SUSY).

SUSY и великое объединение

Еще одна мотивация для SUSY исходит из объединения сил.

- Экстраполяция констант связи сильного, слабого и электромагнитного взаимодействий на более высокие энергии показывает, что в Стандартной модели они почти, но не совсем, сходятся в одной точке.
- В SUSY, с учетом вкладов партнерских частиц, константы красиво сходятся примерно на 10^{16} ГэВ.

Это предполагает, что на очень высоких энергиях три силы могут объединиться в **Великую объединенную теорию (GUT)**.

SUSY как кандидат на темную материю

Суперсимметрия также предлагает естественного кандидата на **темную материю**.

Если SUSY верна, одна из партнерских частиц должна быть стабильной и электрически нейтральной. Главный кандидат — **легчайший нейтралино**, смесь бино, вино и хиггсино.

Нейтралино взаимодействуют только слабо, что соответствует профилю WIMP (слабо взаимодействующие массивные частицы). Если их обнаружат, они могут объяснить 27% недостающей массы Вселенной.

Экспериментальные поиски SUSY

На протяжении десятилетий физики надеялись, что суперсимметричные частицы появятся чуть выше уже исследованных энергетических масштабов.

- **LEP (ЦЕРН, 1990-е):** Никаких SUSY-частиц не найдено до ~ 100 ГэВ.
- **Тэватрон (Фермилаб, 1990-е–2000-е):** Никаких партнерских частиц не найдено.
- **LHC (ЦЕРН, 2010-е–2020-е):** Столкновения протон-протон до **13,6 ТэВ** (проект: **14 ТэВ**). Несмотря на обширные поиски, не найдено доказательств существования скварков, глюино или нейтралино до масштабов нескольких ТэВ.

Отсутствие SUSY на LHC стало разочарованием. Многие из самых простых версий SUSY, такие как “Минимальная суперсимметричная стандартная модель” (MSSM), теперь сильно ограничены. “Естественные” спектры стали тяжелее, что указывает на большую тонкую настройку, если SUSY находится близко к ТэВ-масштабу.

Тем не менее, SUSY не исключена. Более сложные модели предсказывают более тяжелые или более тонкие партнерские частицы, возможно, вне досягаемости LHC, или с взаимодействиями, которые слишком слабы для легкого обнаружения.

Математическая элегантность SUSY

Помимо своих феноменологических мотивов, SUSY обладает глубокой математической красотой.

- Это единственное возможное расширение симметрий пространства-времени, совместимое с теорией относительности и квантовой механикой.
- Суперсимметричные теории часто более вычислимы: они укрощают бесконечности и раскрывают скрытые структуры в квантовой теории поля.
- В теории струн SUSY необходима для согласованности: без нее теория содержит тахионы и другие патологии.

Даже если природа не реализует SUSY на доступных энергетических масштабах, ее математика уже обогатила физику.

Статус суперсимметрии

Сегодня SUSY находится в странном положении.

- Она остается одной из самых привлекательных структур для физики за пределами Стандартной модели.
- Она решает проблему иерархии, поддерживает объединение и предлагает кандидата на темную материю.
- Тем не менее, экспериментальных доказательств пока нет.

Если LHC и его преемники ничего не найдут, SUSY может реализоваться только на масштабах, далеких от нашего охвата — или, возможно, природа выбрала совершенно другой путь.

Метод, а не догма

Суперсимметрия иллюстрирует научный метод в действии.

Физики выявили проблемы: проблему иерархии, объединение, темную материю. Они предложили новую и смелую симметрию, которая решает их все. Они разработали эксперименты для ее проверки. Пока результаты отрицательные — но это не значит, что идея была напрасной. SUSY отточила наши инструменты, прояснила, что мы ищем, и вдохновила поколения исследований.

Как эфир или эпициклы до нее, SUSY может быть шагом к более глубокой истине, независимо от того, станет ли она последним словом.

Теория струн и М-теория

Физика за пределами Стандартной модели часто движима исправлениями: решение проблемы иерархии, объяснение темной материи, объединение калибровочных взаимодействий. Теория струн отличается. Она начинается не с конкретной загадки. Вместо этого она начинается с математики — и заканчивается переписыванием всей нашей концепции пространства, времени и материи.

Происхождение: теория, рожденная из неудачи

Удивительно, но теория струн началась не как теория всего, а как неудачная попытка понять сильное ядерное взаимодействие.

В конце 1960-х годов, до полного развития КХД, физики пытались объяснить зоопарк адронов. Они заметили узоры в данных рассеяния, которые предполагали, что резонансы можно моделировать как колеблющиеся струны.

“Модель двойного резонанса”, предложенная Венециано в 1968 году, описывала сильные взаимодействия так, как будто адроны были возбуждениями маленьких струн. Это была элегантная модель, но она была быстро оставлена, когда КХД стала настоящей теорией сильного взаимодействия.

Тем не менее, теория струн отказалась умирать. В ее уравнениях скрывались замечательные свойства, которые указывали за пределы ядерной физики.

Удивительное открытие: гравитон

Когда теоретики квантовали колебания струн, они обнаружили, что спектр неизбежно включает **безмассовую частицу со спином 2**.

Это было потрясающе. Квантовая теория поля показала, что безмассовая частица со спином 2 уникальна: это должен быть квант гравитации, **гравитон**.

Как позже отметил Джон Шварц: *“Но удивительный факт стал очевиден: математика теории струн неизбежно включала безмассовую частицу со спином 2 — гравитон.”*

То, что начиналось как теория адронов, случайно создало строительный блок квантовой гравитации.

Центральная идея: струны, а не точки

В основе теории струн точечные частицы заменяются маленькими одномерными объектами: струнами.

- Струны могут быть **открытыми** (с двумя концами) или **закрытыми** (петлями).
- Различные колебательные состояния струны соответствуют разным частицам.
 - Одно колебание может проявляться как фотон.
 - Другое — как глюон.
 - Другое — как кварк.
 - И одно состояние, неизбежно, как гравитон.

Эта простая смена — от точек к струнам — решает многие бесконечности, которые мучают квантовую гравитацию. Конечный размер струны размывает взаимодействия, которые иначе взрываются на нулевом расстоянии.

Суперсимметрия и суперструны

Ранние версии теории струн имели проблемы: они включали тахионы (нестабильности) и требовали нереалистичных свойств. Прорыв произошел с введением **суперсимметрии**, что в 1970-х и 1980-х годах привело к **теории суперструн**.

Суперструны устранили тахионы, включили фермионы и принесли новую математическую согласованность.

Но был подвох: теория струн работает только в более высоких измерениях. В частности, **10 пространственно-временных измерений**.

- Четыре измерения, которые мы видим (три пространственных измерения, одно временное).
- Шесть других измерений, компактифицированных или свернутых на малых масштабах, невидимых для текущих экспериментов.

Эта идея, хотя и радикальная, не была совсем новой. В 1920-х годах **теория Калуцы-Клейна** уже предположила, что дополнительные измерения могут объединить гравитацию и электромагнетизм. Теория струн возродила эту идею и значительно расширила ее.

Пять теорий струн

К середине 1980-х годов физики обнаружили, что теория струн не уникальна, а существует в **пяти различных версиях**:

1. **Тип I** — открытые и закрытые струны, включая ориентированные и неориентированные струны.
2. **Тип IIA** — закрытые струны, ориентированные, нехиральные.
3. **Тип IIB** — закрытые струны, ориентированные, хиральные.
4. **Гетеротическая $SO(32)$** — закрытые струны с гибридной структурой.
5. **Гетеротическая $E_8 \times E_8$** — версия с высокой симметрией, позже ставшая важной для связи с реальной физикой частиц.

Каждая казалась математически согласованной, но почему природа должна выбрать одну?

Первая революция суперструн

В 1984 году Майкл Грин и Джон Шварц показали, что теория струн может автоматически устранять квантовые аномалии — то, что квантовые теории поля должны были тщательно проектировать. Это открытие вызвало **первую революцию суперструн**, когда тысячи физиков обратились к теории струн как к кандидату на объединенную теорию всех сил.

Это был первый серьезный фреймворк, в котором квантовая гравитация была не только согласованной, но и неизбежной.

Вторая революция суперструн: М-теория

В середине 1990-х годов произошла вторая революция. Эдвард Виттен и другие обнаружили, что пять различных теорий струн не были конкурентами, а представляли разные пределы одной более глубокой теории: **М-теории**.

Считается, что М-теория существует в **11 измерениях** и включает не только струны, но и объекты в более высоких измерениях, называемые **бранами** (сокращение от мембран).

- Одномерные браны = струны.
- Двумерные браны = мембраны.
- Браны более высоких измерений до 9 пространственных измерений.

Эти браны открыли новые и богатые возможности: целые вселенные могли существовать как трехмерные браны, плавающие в более высокомерном объеме, где гравитация просачивается в объем, тогда как другие силы остаются привязанными. Эта картина вдохновила современные модели дополнительных измерений, такие как **Рэндалл-Сандрам**.

Замечательные примеры: Калуца-Клейн и Рэндалл-Сандрам

- **Калуца-Клейн (1920-е)**: Предложила пятое измерение для объединения гравитации и электромагнетизма. Идея была заброшена на десятилетия, но теория струн возродила ее в гораздо большем масштабе. Компактифицированные дополнительные измерения остаются ключевой особенностью струнных моделей.

- **Рэндалл-Сандрам (1999):** Предложила “искривленные” дополнительные измерения, где наша Вселенная — трехмерная брана, встроенная в более высокие измерения. Гравитация распространяется в объем, что объясняет, почему она слабее других сил. Такие модели предсказывают возможные сигналы в ускорителях частиц или отклонения от закона Ньютона на очень коротких расстояниях.

Экспериментальные подсказки и вызовы

Теория струн делает смелые утверждения, но их проверка невероятно сложна.

- **Дополнительные измерения:** Могут проявляться через сигналы пропавшей энергии или **возбуждения Калуцы-Клейна** — возможно, для **гравитонов или даже полей Стандартной модели**, в зависимости от конфигурации. Ограничения коллайдеров обычно достигают **многих ТэВ**.
- **Гравитоны:** Предсказывается безмассовая частица со спином 2, но обнаружение одного гравитона выходит за рамки воображимой технологии. Косвенные эффекты, такие как отклонения в гравитационных волнах, возможны.
- **Суперсимметрия:** Теория струн требует SUSY на каком-то масштабе, но LHC еще не нашел партнерских частиц.
- **Космология:** Ранняя Вселенная, инфляция и космический микроволновый фон могут нести следы струнной физики, хотя результаты пока неопределенны.

Несмотря на вызовы, теория струн обеспечила плодородную почву для математики, вдохновляя прогресс в геометрии, топологии и дуальностях, таких как AdS/CFT (связывающая гравитацию в более высоких измерениях с квантовой теорией поля без гравитации).

Красота и противоречия

Сторонники утверждают, что теория струн — это наиболее многообещающий путь к объединенной теории: она включает квантовую гравитацию, объединяет все силы и объясняет, почему гравитон должен существовать.

Критики утверждают, что без экспериментального подтверждения теория струн рискует оторваться от эмпирической науки. Ее огромный “ландшафт” возможных решений (до 10^{500}) затрудняет получение уникальных предсказаний.

Обе стороны согласны в одном: теория струн изменила наше мышление о физике и дала новый язык для объединения.

На пути к теории всего

Если суперсимметрия — это следующий шаг за пределами Стандартной модели, то теория струн — следующий шаг: кандидат на долгожданную **Теорию всего**.

Ее самое смелое утверждение не в том, что она включает только Стандартную модель и гравитацию, а в том, что это неизбежные последствия вибрирующих струн в более высоких измерениях. Гравитон — это не дополнение, он встроен.

Выбрала ли природа этот путь, еще предстоит выяснить.

Исследование границ: эксперименты за пределами Стандартной модели

Теории — это жизненная кровь физики, но эксперименты — ее бьющееся сердце. Суперсимметрия, теория струн и дополнительные измерения — это прекрасные математические конструкции, но они живут или умирают с доказательствами. Если они хотят быть чем-то большим, чем спекуляции, они должны оставить следы в данных.

Физики разработали умные способы поиска этих следов — в ускорителях, в космосе и в самой структуре пространства-времени.

Коллайдеры: охота за партнерскими частицами и гравитонами

Большой адронный коллайдер (LHC) в ЦЕРНе — самый мощный ускоритель частиц в мире, сталкивающий протоны на энергиях до **13,6 ТэВ** (проект: **14 ТэВ**). Это был главный инструмент человечества для исследования физики за пределами Стандартной модели.

Суперсимметрия на LHC

- **Поиск партнерских частиц:** Эксперименты ATLAS и CMS анализировали данные в поисках скварков, глюино и нейтралино/чарджино. Они часто проявляются как сигналы “пропавшей энергии”, поскольку SUSY-частицы ускользают от обнаружения.
- **Результаты:** Никаких подтвержденных SUSY-частиц не найдено до масштабов нескольких ТэВ. Это исключило многие из простейших версий SUSY и подтолкнуло “естественные” спектры к более тяжелым, более тонко настроенным областям.

Гравитоны и дополнительные измерения

- **Состояния Калуцы-Клейна:** Если дополнительные измерения существуют, **гравитоны или даже поля Стандартной модели** могут проявляться как тяжелые возбуждения КК, обнаруживаемые как резонансы в каналах ди-лептонов, ди-фотонов или ди-струй.
- **Сигналы Рэндалл-Сандрам:** Искривленные дополнительные измерения могут создавать резонансы гравитонов с характерными угловыми узорами спина 2.
- **Результаты:** Поиски на LHC пока не нашли доказательств, но установили ограничения до **многих ТэВ**, ограничивая размер, искривление и геометрию дополнительных измерений.

Микроскопические черные дыры

Некоторые теории предполагают, что если гравитация становится сильной на ТэВ-масштабе, в столкновениях LHC могут образоваться крошечные черные дыры, испа-

ряющиеся в вспышках частиц. Такие события не наблюдались.

Точные эксперименты: тестирование гравитации на малых масштабах

Если дополнительные измерения существуют, закон гравитации Ньютона может нарушаться на коротких расстояниях.

- **Эксперименты с торсионным балансом (“Eöt-Wash”):** Проверяют закон обратных квадратов до **субмиллиметровых масштабов** — в настоящее время **десятки микрометров (~50 мкм)**.
- **Результаты:** Отклонений не найдено. Эти эксперименты **исключают** широкий спектр сценариев дополнительных измерений с характерными длинами **больше $\sim 10^{-4}$ метра** (в зависимости от модели).

Эти настольные эксперименты невероятно чувствительны и исследуют масштабы, недоступные для ускорителей.

Гравитационные волны: новое окно в квантовую гравитацию

Открытие гравитационных волн LIGO в 2015 году открыло новую границу.

- **Дополнительные поляризации / измененное распространение:** Некоторые модели квантовой гравитации или дополнительных измерений предсказывают отклонения от ОТО (дополнительные поляризации, рассеяние или измененный спад).
- **Спектроскопия спада:** “Спад” черных дыр после слияния может выявить тонкие отклонения от ОТО.
- **Примордиальные гравитационные волны:** Волны от Большого взрыва могут нести следы струнной физики, обнаруживаемые будущими обсерваториями, такими как LISA или телескоп Эйнштейна.

На данный момент наблюдения соответствуют ОТО в пределах текущих неопределенностей, но более высокая точность может принести сюрпризы.

Космология: Вселенная как лаборатория

Сама Вселенная — это конечный ускоритель частиц.

- **Космический микроволновый фон (СМВ):** Маленькие флуктуации картируют раннюю Вселенную. Некоторые струнные модели предсказывают специфические сигналы, такие как негауссовские распределения или осциллирующие особенности.
- **Инфляция:** Быстрое расширение Вселенной могло быть вызвано полями, связанными с теорией струн. Обнаружение примордиальных В-модов в СМВ было бы сильным доказательством.
- **Поиски темной материи:** Нейтралино из SUSY — ведущие кандидаты на темную материю. Эксперименты, такие как XENONnT, LUX-ZEPLIN и PandaX, ищут WIMP

через ядерные отдачи.

- **Аксионы:** Теория струн также предсказывает аксионоподобные частицы, которые могут быть обнаружены через резонансные полости или астрономические наблюдения.

Пока небо молчит. Темная материя остается необнаруженной, а космологические данные соответствуют модели Λ CDM без явных отпечатков струн.

Текущий статус: ограничения, а не подтверждения

Десятилетия поисков не подтвердили SUSY, дополнительные измерения или струнные сигналы. Но отсутствие доказательств не является доказательством отсутствия:

- SUSY может существовать на масштабах вне досягаемости LHC или в менее очевидных спектрах; отрицательные результаты до сих пор **благоволят более тонко настроенным версиям (“менее естественным”)**, если SUSY близка к ТэВ-масштабу.
- Дополнительные измерения могут быть меньше, более искривлены или как-то скрыты от текущих зондов.
- Теория струн может оставить обнаруживаемые следы только в очень ранней Вселенной, доступные только через космологию.

Некоторые **точные аномалии** (например, измерение **(g-2)** мюона и некоторые **напряжения в физике ароматов**) остаются **интригующими, но неразрешенными**; они продолжают стимулировать исследования, не опрокидывая Стандартную модель пока что.

Эксперименты **сужают пространство параметров**. Они сказали нам, где SUSY нет, насколько малы должны быть дополнительные измерения и как сильно или слабо может взаимодействовать темная материя.

Путь вперед

Будущие эксперименты обещают более глубокое исследование:

- **LHC с высокой светимостью (HL-LHC):** Соберет в 10 раз больше данных, исследуя SUSY до более высоких масс и редких процессов.
- **Будущий кольцевой коллайдер (FCC-hh):** Предлагаемый ускоритель на 100 ТэВ, достаточно мощный, чтобы исследовать энергетические масштабы, где может проявиться физика GUT.
- **LISA (2030-е):** Космическая обсерватория гравитационных волн, чувствительная к примордиальным сигналам из ранней Вселенной.
- **Детекторы темной материи следующего поколения:** С чувствительностью к слабым сигналам они могут наконец поймать WIMP или аксион.

Наука как путешествие

Экспериментальная история физики за пределами Стандартной модели — это не история неудач, а история процесса.

- Отрицательные результаты исключают простые модели и оттачивают наши теории.
- Каждое ограничение направляет нас к более утонченным и предсказательным структурам.
- Отсутствие SUSY или дополнительных измерений на ТэВ-масштабе не уничтожает эти идеи — оно толкает их на новую территорию.

Как эксперимент Резерфорда с золотой фольгой разрушил модель сливового пудинга, или LIGO устранил сомнения в гравитационных волнах, следующее великое открытие может прийти внезапно — и изменить все.

На пути к теории всего

На протяжении веков физика продвигалась через объединение. Ньютон объединил небо и землю под одним законом гравитации. Максвелл объединил электричество и магнетизм. Эйнштейн объединил пространство и время. Электрослабая теория показала, что две очень разные силы — это аспекты одной силы.

Следующий естественный шаг — самый смелый на сегодняшний день: **объединение всех четырех фундаментальных взаимодействий** — сильного, слабого, электромагнитного и гравитационного — в одной последовательной структуре. Это Святой Грааль физики: **Теория всего (ТоЕ)**.

Почему ТоЕ важна

Полное объединение — это не только философская красота; оно решает практические и концептуальные глубокие проблемы:

- **Квантовая гравитация:** Общая теория относительности рухнет на планковском масштабе (10^{19} ГэВ). Только теория квантовой гравитации может объяснить черные дыры и сингулярности Большого взрыва.
- **Естественность и тонкая настройка:** Проблема иерархии и проблема космологической постоянной требуют более глубокого объяснения.
- **Параметры Стандартной модели:** Почему у частиц такие массы и заряды? Почему три поколения кварков и лептонов? ТоЕ может объяснить эти загадки.
- **Космология:** Темная материя, темная энергия и инфляция могут быть связаны с физикой на масштабе объединения.

ТоЕ объединяет не только силы — она объединяет масштабы, от мельчайших струн квантовой теории до крупнейших космических структур.

Суперсимметрия и великое объединение

Суперсимметрия (SUSY), если она реализована в природе, предлагает шаг к ТоЕ.

- **Проблема иерархии решена:** Партнерские частицы отменяют расходящиеся поправки к массе Хиггса.
- **Константы калибровочных взаимодействий объединены:** С SUSY силы трех взаимодействий красиво сходятся около 10^{16} ГэВ, указывая на **Великую объединенную теорию (GUT)**.
- **Кандидат на темную материю:** Нейтралино предлагает естественное объяснение космической темной материи.

GUT, вдохновленные SUSY (такие как SU(5), SO(10) или E_6), предполагают, что на чрезвычайно высоких энергиях кварки и лептоны сливаются в более крупные мультиплеты, а силы объединяются в одну калибровочную группу.

Но SUSY еще не появилась в экспериментах. Если она существует только на масштабах вне нашего охвата, ее объединяющая сила может оставаться соблазнительной, но скрытой.

Теория струн: квантовая гравитация и гравитон

Теория струн идет дальше. Вместо того чтобы чинить Стандартную модель, она переписывает основы:

- **Струны, а не точки:** Все частицы — это вибрации маленьких струн.
- **Гравитон появляется естественно:** Безмассовая возбуждение со спином 2 неизбежна, что означает, что квантовая гравитация встроена.
- **Объединение:** Различные колебательные состояния производят все известные частицы — кварки, лептоны, калибровочные бозоны, Хиггс — в одной структуре.
- **Дополнительные измерения:** Теория струн требует 10 пространственно-временных измерений; М-теория требует 11, с скрытыми измерениями, компактифицированными или искривленными.

В этой концепции объединение — это не случайность, а геометрия. Силы различаются, потому что струны вибрируют по-разному, формируемые топологией дополнительных измерений.

М-теория и миры бран

Открытие, что пять теорий струн связаны дуальностями, привело к М-теории, еще более крупной структуре:

- Включает струны, мембраны и браны в более высоких измерениях.
- Предполагает, что наша Вселенная может быть трехмерной браной, плавающей в более высокомерном объеме.
- Предлагает естественные объяснения, почему гравитация слабее (она просачивается в объем) и как могут существовать множественные вселенные в “мультивселенной”.

М-теория все еще не завершена, но это самый смелый шаг к ТоЕ, который когда-либо предпринимался.

Другие пути к квантовой гравитации

Теория струн и М-теория — не единственные пути. Физики исследуют несколько структур, каждая с разными сильными сторонами:

- **Квантовая гравитация в петлях (LQG):** Пытается напрямую квантовать пространство-время, предсказывая, что пространство дискретно на планковском масштабе.
- **Асимптотическая безопасность:** Предполагает, что гравитация может вести себя хорошо на высоких энергиях благодаря нетривиальной фиксированной точке.
- **Причинные динамические триангуляции (CDT):** Строит пространство-время из простых геометрических строительных блоков.
- **Теория твисторов и амплитудоздрон:** Инновационные математические структуры, переосмысливающие пространство-время и амплитуды рассеяния.

Хотя ни одна из них пока не конкурирует с объединяющим размахом теории струн, они иллюстрируют богатство поисков.

Роль экспериментов

ТоЕ в конечном итоге должна быть тестируемой. Хотя планковский масштаб далеко за пределами текущих экспериментов, физики ищут косвенные доказательства:

- **Коллайдеры:** Частицы SUSY, дополнительные измерения или микроскопические черные дыры.
- **Точные тесты:** Отклонения от закона Ньютона на коротких расстояниях.
- **Гравитационные волны:** Экзотические поляризации или эхо из более высоких измерений.
- **Космология:** Следы инфляции, кандидаты на темную материю или аксионы, предсказанные теорией струн.

Пока ТоЕ остается вне досягаемости, но каждый отрицательный результат сужает возможности.

Красота и вызов

Настоящая ТоЕ объединяет не только физику — она объединяет **человеческое знание**. Она связывает квантовую механику и теорию относительности, микро и макро, частицу и космос.

Но она сталкивается с парадоксом: масштаб, на котором происходит объединение, может быть навсегда вне экспериментального охвата. Ускоритель на 100 ТэВ исследует лишь часть пути к планковскому масштабу. Нам, возможно, придется полагаться на космологию, математическую согласованность или косвенные сигналы.

Мечта живет благодаря глубокой красоте структур. Как отметил Виттен, теория струн — это не просто “набор уравнений”, а “новая структура для физики”.

Наука как метод, а не догма

Поиск ТоЕ — это не о том, чтобы объявить теорию струн, SUSY или какую-либо идею “истинной”. Это о **научном методе**:

- Выявление трещин в существующих теориях.
- Предложение новых и смелых структур.
- Проверка их на соответствие реальности, отбрасывание или уточнение по мере необходимости.

История еще не закончена. Но именно эта открытость — отказ считать любую теорию священной — делает физику живой наукой, а не догмой.

Горизонт впереди

Физика следующего века может раскрыть:

- Доказательства суперсимметрии или ее альтернатив.
- Космологические данные, подтверждающие или опровергающие предсказания струн.
- Глубокую переписывание самого пространства-времени.

Или, возможно, настоящая ТоЕ — это нечто, что еще никто не вообразил.

Но сам поиск — стремление к объединению, объяснению, видению природы как целого — это столько же часть человечества, сколько сами уравнения.

Ссылки и дополнительное чтение

Суперсимметрия и великое объединение

- Wess, J., и Bagger, J. (1992). *Supersymmetry and Supergravity*. Princeton University Press.
- Baer, H., и Tata, X. (2006). *Weak Scale Supersymmetry: From Superfields to Scattering Events*. Cambridge University Press.
- Georgi, H., и Glashow, S. L. (1974). “Unity of All Elementary Particle Forces.” *Physical Review Letters*, 32(8), 438.

Теория струн и М-теория

- Green, M. B., Schwarz, J. H., и Witten, E. (1987). *Superstring Theory* (тома 1 и 2). Cambridge University Press.
- Polchinski, J. (1998). *String Theory* (тома 1 и 2). Cambridge University Press.
- Witten, E. (1995). “String Theory Dynamics in Various Dimensions.” *Nuclear Physics B*, 443(1), 85–126.
- Becker, K., Becker, M., и Schwarz, J. H. (2006). *String Theory and M-Theory: A Modern Introduction*. Cambridge University Press.

Квантовая гравитация в петлях и альтернативы

- Rovelli, C. (2004). *Quantum Gravity*. Cambridge University Press.
- Thiemann, T. (2007). *Modern Canonical Quantum General Relativity*. Cambridge University Press.
- Ambjørn, J., Jurkiewicz, J., и Loll, R. (2005). "Reconstructing the Universe." *Physical Review D*, 72(6), 064014.

Экспериментальные ограничения

- Aad, G., et al. (ATLAS Collaboration). (2012). "Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson." *Physics Letters B*, 716(1), 1–29.
- Chatrchyan, S., et al. (CMS Collaboration). (2012). "Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV." *Physics Letters B*, 716(1), 30–61.
- Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific Collaboration и Virgo Collaboration). (2016). "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger." *Physical Review Letters*, 116(6), 061102.

Доступные популярные отчеты

- Green, B. (1999). *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. W. W. Norton.
- Randall, L. (2005). *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions*. Harper Perennial.
- Rovelli, C. (2016). *Seven Brief Lessons on Physics*. Riverhead Books.
- Wilczek, F. (2008). *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces*. Basic Books.