

# Почему во Вселенной победила материя: загадка барионной асимметрии

Дата публикации: 10.06.2026

Согласно современным представлениям о Большом взрыве, в первые мгновения существования Вселенной материя и антиматерия должны были возникнуть практически в одинаковых количествах. Каждой частице материи соответствует античастица с той же массой, но противоположными квантовыми характеристиками. Когда частица встречается со своей античастицей, происходит аннигиляция — обе превращаются в чистую энергию в виде излучения.

Если бы во время рождения Вселенной количество материи и антиматерии было строго одинаковым, то спустя короткое время почти все частицы взаимно уничтожились бы. Космос оказался бы заполнен лишь излучением. Не возникли бы звезды, галактики, планеты и жизнь. Однако мы существуем, а значит, в ранней Вселенной произошел некий процесс, нарушивший идеальное равновесие.

Эта проблема известна как загадка барионной асимметрии Вселенной. Под барионами физики понимают частицы вроде протонов и нейтронов, из которых состоит обычное вещество. Наблюдения показывают, что на каждый миллиард пар материя-антиматерия в молодой Вселенной приходилась примерно одна лишняя частица материи. На первый взгляд такое преимущество кажется ничтожным. Но после того как остальные частицы и античастицы аннигилировали, именно этот крошечный избыток сформировал всю видимую Вселенную.

В 1967 году советский физик Андрей Сахаров предложил теоретическую основу, объясняющую, как могла возникнуть подобная асимметрия. Он сформулировал три необходимых условия, которые сегодня называют условиями Сахарова.

Первое условие требует нарушения барионного числа. Это означает, что в природе должны существовать процессы, способные изменять количество барионов и антибарионов. Если число таких частиц всегда сохраняется строго одинаковым, создать избыток материи невозможно.

Второе условие связано с нарушением симметрий  $C$  и  $CP$ . Симметрия  $C$ , или зарядовое сопряжение, предполагает замену всех частиц на античастицы. Симметрия  $P$ , или пространственная четность, соответствует зеркальному

отражению физического процесса. Если объединить обе операции, получится CP-преобразование. Если бы CP-симметрия выполнялась абсолютно точно, материя и антиматерия вели бы себя одинаково. Для появления избытка материи необходимо, чтобы законы физики хотя бы немного различались для частиц и античастиц.

Третье условие требует, чтобы процессы происходили вне термодинамического равновесия. В равновесной системе любые возникшие различия быстро компенсируются обратными реакциями. Поэтому асимметрия может закрепиться только в условиях быстрого расширения и охлаждения молодой Вселенной.

Наиболее известным экспериментальным подтверждением нарушения CP-симметрии стало открытие американских физиков Джеймса Кронина и Вэла Фитча в 1964 году. Исследуя распады нейтральных каонов, они обнаружили, что природа действительно делает небольшое различие между материей и антиматерией. Это открытие стало настоящей сенсацией и принесло ученым Нобелевскую премию по физике в 1980 году.

Однако вскоре выяснилась серьезная проблема. Наблюдаемое в каонах CP-нарушение оказалось слишком слабым. Его величины недостаточно для объяснения реального избытка материи во Вселенной. Даже с учетом последующих открытий в системе В-мезонов Стандартная модель физики элементарных частиц не может полностью объяснить происхождение барионной асимметрии.

Поэтому современные физики продолжают искать новые источники CP-нарушения. Одними из главных инструментов в этой работе стали эксперименты LHCb на Большом адронном коллайдере в ЦЕРН и Belle II в Японии. Эти установки исследуют распады В-мезонов, D-мезонов и других нестабильных частиц с беспрецедентной точностью.

В течение 2025 и 2026 годов обе коллаборации представили новые результаты, в которых наблюдаются отдельные отклонения от предсказаний Стандартной модели. Некоторые измерения намекают на возможное существование дополнительных источников CP-нарушения. Однако статистическая значимость этих эффектов пока недостаточна для официального объявления открытия. Для окончательных выводов потребуется значительно больший объем данных.

Еще одной перспективной идеей считается лептогенезис. Согласно этой гипотезе, асимметрия возникла сначала не среди барионов, а среди лептонов — семейства частиц, к которому относятся электроны, мюоны, тау-лептоны и

нейтрино. На ранних этапах эволюции Вселенной возник небольшой избыток лептонов над антилептонами, который затем через специальные процессы был частично преобразован в избыток барионов.

Ключевую роль в этой картине играют гипотетические тяжелые нейтрино. Их существование естественным образом объясняется механизмом качелей, известным как *see-saw mechanism*. Согласно этой идее, наблюдаемые нейтрино обладают чрезвычайно малыми массами именно потому, что существуют их очень тяжелые партнеры. Чем тяжелее такие частицы, тем легче оказываются обычные нейтрино.

Массы гипотетических тяжелых нейтрино могут находиться вблизи масштаба Великого объединения фундаментальных взаимодействий и во много триллионов раз превышать массы известных элементарных частиц. В ранней горячей Вселенной они могли распадаться с нарушением CP-симметрии, создавая избыток лептонов. Позднее этот дисбаланс превращался в наблюдаемую сегодня барионную асимметрию.

Загадка барионной асимметрии остается одной из главных нерешенных проблем современной физики. Она напрямую связана с вопросом о том, почему существует вся наблюдаемая материя. Эксперименты LHCb и Belle II постепенно сужают круг возможных объяснений, а исследования нейтрино продолжают проверять сценарии лептогенезиса. Если окажется, что известных источников CP-нарушения недостаточно, или будут обнаружены новые частицы, включая тяжелые нейтрино, это станет убедительным свидетельством существования физики за пределами Стандартной модели и приблизит ученых к пониманию того, почему Вселенная оказалась заполнена материей, а не исчезла в гигантской вспышке аннигиляции спустя мгновения после Большого взрыва.