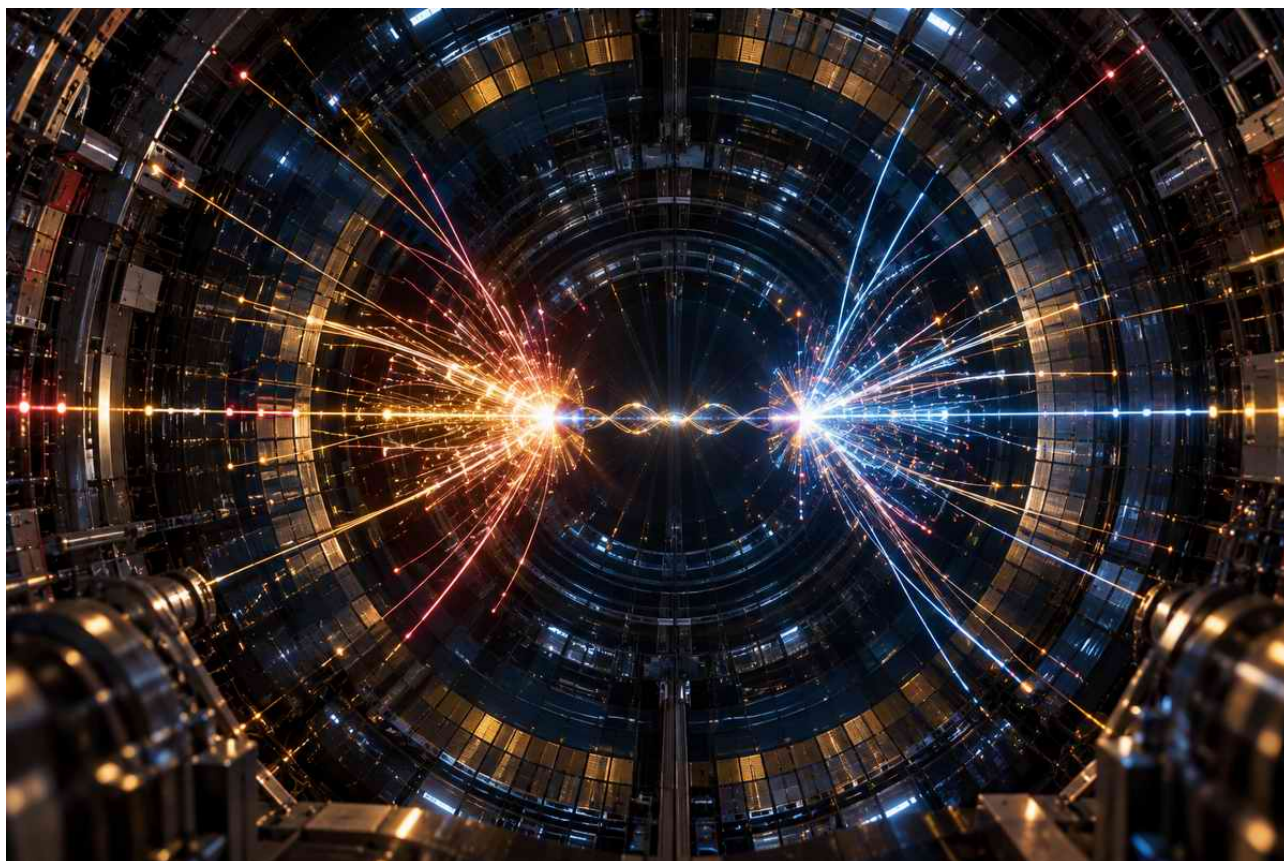


Квантовая запутанность помогла физикам проверить одну из возможных причин исчезновения антиматерии



Дата публикации: 04.09.2026

Если в ранней Вселенной материя и антиматерия возникали почти симметрично, почему сегодня вокруг нас практически одна материя? Этот вопрос остается одной из фундаментальных нерешенных проблем физики. Известные законы допускают небольшое различие в поведении материи и антиматерии, однако обнаруженных эффектов недостаточно, чтобы объяснить наблюдаемое космическое превосходство вещества.

Коллаборация BESIII предложила искать возможный след неизвестной физики внутри чрезвычайно короткоживущей частицы — лямбда-гиперона Λ . Используя около трех миллионов квантово-запутанных пар Λ и анти- Λ , ученые установили наиболее строгое на сегодняшний день прямое ограничение на электрический дипольный момент этой частицы. Чувствительность эксперимента улучшилась примерно на три порядка по сравнению с предыдущим прямым измерением, выполненным более сорока лет назад.

Что же физики пытались обнаружить? Электрический дипольный момент, или ЭДМ, характеризует пространственное разделение положительного и отрицательного электрического заряда. У привычной молекулы такое разделение представить относительно легко. Но для элементарной или субатомной частицы с собственным угловым моментом — спином — постоянный ЭДМ приобретает фундаментальное значение.

Если направление электрического дипольного момента частицы жестко связано с ее спином, физические законы перестают выглядеть одинаково при некоторых преобразованиях симметрии. В частности, ненулевой постоянный ЭДМ означал бы нарушение симметрии обращения времени T . При выполнении фундаментальной CPT -симметрии это также указывало бы на нарушение комбинированной CP -симметрии, связывающей замену частицы античастицей и зеркальное отражение пространства.

Именно CP -нарушение особенно интересно в контексте происхождения материи. Оно существует в Стандартной модели и экспериментально наблюдается в распадах некоторых частиц. Проблема в масштабе: известных источников, по современным оценкам, недостаточно, чтобы объяснить огромную асимметрию между материей и антиматерией во Вселенной. Поэтому физики ищут дополнительные механизмы CP -нарушения.

ЭДМ удобен тем, что способен выдать присутствие новой физики косвенно. Необязательно непосредственно производить неизвестную тяжелую частицу на ускорителе. Новые взаимодействия могут слегка изменить свойства уже известных частиц, оставив крошечный след в измеряемом дипольном моменте. Именно поэтому чрезвычайно точные поиски ЭДМ электронов, нейтронов, атомов и молекул стали одним из инструментов проверки Стандартной модели.

С лямбда-гипероном ситуация сложнее. Λ — нестабильный барион, состоящий из верхнего, нижнего и странного кварков. Он живет лишь ничтожную долю секунды, поэтому классический подход, при котором наблюдают изменение ориентации спина частицы во внешнем электромагнитном поле, реализовать значительно труднее.

BESIII воспользовался совершенно другим ресурсом — квантовой запутанностью.

На Пекинском электрон-позитронном коллайдере BEPCII электроны и позитроны сталкиваются с образованием различных частиц, в том числе J/ψ -мезонов. Некоторые J/ψ распадаются на пару Λ и анти- Λ . Законы квантовой механики связывают спиновые состояния двух рожденных частиц: измерительные характеристики одной части системы нельзя полностью описать

независимо от другой.

Но как узнать ориентацию спина частицы, которая почти сразу исчезает? Здесь помогает сам распад. Λ распадается, в частности, на протон и отрицательный пион, а анти- Λ — на антипротон и положительный пион. Слабое взаимодействие в этих распадах нарушает пространственную четность, поэтому направления разлета дочерних частиц несут информацию о поляризации исходных гиперонов.

Получается своеобразный природный анализатор спина. Исследователям не нужно успевать прикрепить к лямбда-гиперону воображаемый датчик. Частица сама оставляет информацию о своем спиновом состоянии в геометрии собственного распада.

Команда отобрала около трех миллионов событий $J/\psi \rightarrow \Lambda$ -анти- Λ высокой чистоты и выполнила многомерный анализ угловых распределений продуктов распада. Именно в тонких корреляциях между направлениями движения протонов, антипротонов и пионов физики искали возможный сигнал электрического дипольного момента.

Ненулевого ЭДМ обнаружить не удалось. Но для подобных экспериментов отсутствие сигнала вовсе не означает отсутствие результата. Чем выше точность измерения, тем меньшую область оставляют теоретическим моделям новой физики. BESIII впервые довел прямую чувствительность поиска ЭДМ Λ до порядка 10^{-19} е·см, примерно на три порядка улучшив прежнее прямое ограничение.

Особый интерес представляет странный кварк внутри Λ . Большинство сверхточных поисков ЭДМ проводится в других системах — с электронами, нейтронами, атомами и молекулами. Если неизвестное взаимодействие по-разному связано с различными ароматами кварков, странный сектор может проявить эффекты, которые трудно увидеть в экспериментах с обычным веществом.

Поэтому Λ не конкурирует с нейтроном или электроном за звание «лучшего детектора новой физики». Он предоставляет другую точку наблюдения. Это напоминает поиск неизвестного объекта несколькими телескопами, работающими в разных диапазонах: отсутствие сигнала в одном диапазоне не делает остальные ненужными.

Не менее важен методический результат. Квантовая запутанность обычно ассоциируется с квантовыми компьютерами, криптографией и философскими парадоксами. Эксперимент BESIII показывает более практическую сторону этого явления: запутанность можно превратить в измерительный ресурс для проверки

фундаментальных симметрий природы.

Метод потенциально применим и к другим гиперонам, например Σ и Ξ . Это открывает возможность систематического поиска электрических дипольных моментов среди частиц со странными кварками.

Пока природа снова ответила физикам «ничего необычного не обнаружено». Но каждый новый нулевой результат с большей точностью сужает пространство, в котором может скрываться неизвестная физика. И в данном случае особенно примечателен способ поиска: две частицы, существующие лишь мгновение, благодаря квантовой связи между ними позволили проверить законы симметрии с точностью, недоступной предыдущему поколению экспериментов.

Ссылка: «Измерение электрического дипольного момента λ с помощью запутанной барион-антибарионной системы» DOI: [10.1126/science.adx7334](https://doi.org/10.1126/science.adx7334).