

# История тестирования фундаментальных симметрий

Александр Аксентьев

кафедра 14, факультет Автоматики и электроники, НИЯУ “МИФИ”

## Содержание

<b>1</b>	<b>Симметрия</b>	<b>2</b>
1.1	Что такое симметрия . . . . .	2
1.2	Роль симметрии в физических теориях . . . . .	3
1.3	Симметрии в квантовой механике . . . . .	3
1.3.1	С-симметрия . . . . .	4
1.3.2	Р-симметрия . . . . .	5
1.3.3	Т-симметрия . . . . .	5
1.4	СРТ-теорема . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Эксперименты по проверке симметрий</b>	<b>6</b>
2.1	Р-инвариантность . . . . .	7
2.2	С-инвариантность . . . . .	8
2.3	Т-инвариантность . . . . .	8
<b>3</b>	<b>TRIC: истинный нуль эксперимент</b>	<b>9</b>

## Зачем изучать симметрии

С обще-философской точки зрения, проверка симметрий полезна в связи с тем, что симметрии выполняют следующие важные роли в науке:

1. Классификация. Наилучшим примером такого использования симметрий служит классификация элементарных частиц в терминах групп симметрии фундаментальных физических симметрий.
2. Ограничение физических теорий. Инвариантность относительно преобразования накладывает жёсткие ограничения как на величины, которые могут входить в теорию, так и на форму её фундаментальных уравнений.
3. Унификация. Математический аппарат теории групп, используемый для описания симметрий, открывает возможность для унификации различных симметрий, путём унификации соответствующих групп преобразований; таким образом теории, основанные на симметриях, так же могут быть унифицированы.

Ограничительная роль симметрий проявляется, например, в несоответствии предсказаний Теории Большого Взрыва (физические законы которой симметричны относительно фундаментальных симметрий квантовой физики), и Барионной Асимметрией Вселенной: колоссальным превалированием материи над антиматерией в наблюдаемой вселенной.

В 1967 году, советский физик Андрей Дмитриевич Сахаров предложил три условия, которым должно удовлетворять барион-генерирующее взаимодействие, чтобы в его результате материя и анти-материя производились в разном соотношении. Одним из этих условий является нарушение физическими законами  $C$ - и  $CP$ -симметрий.

# 1 Симметрия

## 1.1 Что такое симметрия

Слово симметрия — производное от слов *сим*, совместно, и *метро*, измерять, — изначально обозначало отношение соизмеримости. Вскоре оно приобрело более общий смысл отношения *пропорциональности*, смысл которого был в объединении различных *элементов* в *единую систему*. Таким образом, с самого зарождения, концепция симметрии заняла центральную роль в естественных теориях. [1]

Современная интерпретация понятия симметрии даётся как инвариантность относительно заданного преобразования. Это значение понятие симметрии приобрело в 17 веке, и оно было основано не на *пропорциональности*, а на *равенстве* соотноси-

мых элементов (например, равенстве левой и правой частей фигуры).<sup>1</sup> Ключевым свойством этой интерпретации является *заменимость* симметричных частей *относительно общего целого*.

Следующим шагом в эволюции концепции симметрии стало развитие алгебраического понятия *группы*; оказалось, что преобразования симметрии формируют группы,<sup>2</sup> то есть (1) композиция преобразований симметрии есть преобразование симметрии, (2) она ассоциативна, (3) преобразование идентичности не нарушает симметрию, и (4) любое преобразование симметрии обратимо.

Определение симметрии как инвариантности относительно определённой группы преобразований сделало это понятие применимым не только в отношении геометрических фигур, но также и математических *выражений*, в частности — уравнений динамики. [1]

## 1.2 Роль симметрии в физических теориях

Первым явным применением принципа инвариантности физических уравнений стала процедура решения уравнений динамики, разработанная немецким математиком Карлом Густавом Якоби. Подход Якоби заключался в использовании канонических преобразований переменных, не изменяющих уравнения Гамильтона системы. Таким образом, изначальная проблема сводилась к эквивалентной (относительно Гамильтоновой формулировки), но более простой. Этот подход привёл к исследованию физических теорий на предмет их преобразуемости; примерами таких исследований служат: (i) исследования инвариантов канонических преобразований (скобки Пуассона, интегралы Пуанкаре), а также (ii) теория непрерывных канонических преобразований норвежского математика Софуса Ли.

Альтернативным подходом обозначенному выше, при котором изучаются симметрии *заданных* физических законов, является *постулирование* определённой симметрии, с последующим поиском законов, удовлетворяющих этой симметрии. Поворотным моментом в методологии науки стала публикация Альбертом Эйнштейном Специальной Теории Относительности, построенной на основании постулата об универсальности непрерывных симметрий пространства-времени. [1]

---

<sup>1</sup>Таким образом, отношение симметрии было обобщено ещё раз, путём разделения на две части: конкретное отношение пропорциональности было заменено равенством, с добавлением арбитрного преобразования, относительно которого имеет смысл соотношение.

<sup>2</sup>Группой называется множество  $G$  вместе с операцией  $\star$  на нём, удовлетворяющей аксиомам группы.

## 1.3 Симметрии в квантовой механике

Наиболее успешным образом принципы симметрии применяются в квантовой физике. Причиной тому послужили два факта: (1) использование математического аппарата теории групп для описания симметрии, а также (2) использование векторного пространства в описании квантовой физики.

Являясь алгебраической структурой, группа может быть представлена набором матриц на векторном пространстве;<sup>3</sup> а поскольку пространство состояний системы в квантовой механике есть векторное пространство, любое состояние сложной системы может быть сведено к линейной комбинации состояний простых систем, преобразуемых матрицей операции симметрии определённым образом.

Для того, чтобы исследовать фундаментальные симметрии, в ядерной физике проводятся эксперименты по рассеянию ускоренного пучка элементарных частиц. При проведении экспериментов по рассеянию, состояния частиц (описываемые амплитудами вероятности) связаны между собой через матрицу рассеяния [2]

$$\mathcal{S}_{fi} \equiv \langle f_{(out)} | i_{(in)} \rangle,$$

где  $|i_{(in)}\rangle$  обозначает  $i$ -ое входное состояние,  $|f_{(out)}\rangle$  –  $f$ -ое выходное.

Матрица рассеяния также выражается (линейно) через матрицу перехода

$$\mathcal{T}_{fi} = \langle f | H_{int} | i_{(in)} \rangle = \langle f_{(out)} | H_{int} | i \rangle,$$

где  $H_{int}$  обозначает Гамильтониан взаимодействия.

Поэтому, формально, о симметриях квантовой теории можно говорить как о симметриях матрицы перехода (или рассеяния) под воздействием соответствующего унитарного оператора:

$$|\langle f' | \mathcal{T} | i' \rangle| = |\langle f | U^\dagger \mathcal{T} U | i \rangle| = |\langle f | \mathcal{T} | i \rangle|.$$

### 1.3.1 С-симметрия

Сопряжением знака называется преобразование, ассоциированное с заменой частиц на анти-частицы, т.е. при котором все заряды меняют знак, в то время как другие

---

<sup>3</sup>В теории представлений, представлением группы  $G$  называется функция из  $G$  во множество преобразований векторного пространства. Таким образом, *каждому* элементу группы сопоставляется матрица преобразования векторного пространства.

величины остаются неизменны. Преобразование сопряжения знака формально описывается оператором  $C$ , действие которого на состояние с определённым значением импульса  $\vec{p}$ , проекции спина  $s$  и зарядом  $q$  есть

$$C|\vec{p}, s, q\rangle = \eta_C|\vec{p}, s, -q\rangle, \quad |\eta_C|^2 = 1.$$

В терминах матрицы рассеяния,  $C$ -симметрия выражается как  $[C, \mathcal{S}] = 0$ , следствием чего является (если обозначать анти-частицы через надчёркивание)

$$\mathcal{S}_{fi} = \eta_C(f)^* \eta_C(i) \mathcal{S}_{\bar{f}\bar{i}}.$$

Из симметрии сопряжения знака обязательно следует наличие античастицы, для любой нейтральной частицы, которая подчиняется тем же самым законам что и частица; с той лишь разницей, что знаки всех её внутренних зарядов заменены на противоположные. Тем не менее, наличие античастиц не достаточно для проверки нарушения  $C$ -симметрии, что связано с более фундаментальной  $CPT$ -симметрией; тесты  $C$ -симметрии связаны со свойствами взаимодействий частиц. [2, стр. 98]

### 1.3.2 Р-симметрия

Преобразование чётности определяется как отражение всех пространственных координат относительно точки отсчёта. В квантовой теории, этому преобразованию соответствует (унитарный) оператор  $P$ , такой что

$$P|\vec{p}, s, q\rangle = \eta_P|-\vec{p}, s, q\rangle, \quad |\eta_P|^2 = 1.$$

Для взаимодействий не нарушающих чётность, т.е. таких что  $[P, \mathcal{S}] = 0$ , на матрицы рассеяния до преобразования  $\mathcal{S}_{fi}$  и после  $\mathcal{S}_{f_P i_P}$  есть

$$\mathcal{S}_{fi} = \eta_P(f)^* \eta_P(i) \mathcal{S}_{f_P i_P}.$$

В связи с тем что оператор спина  $S$  преобразуется как  $P^\dagger S P = S$ ,  $P$ -симметрия теории подразумевает отсутствие  $P$ -нечётных слагаемых (таких как  $\vec{S} \cdot \vec{p}$ ) в сечениях взаимодействий процесса. [2, стр. 30]

**Замечание (Философское значение нарушения Р-симметрии).**

Нарушение Р-симметрии открывает новую главу в споре между субстанциальной и реляционной концепциями пространства.

Субстанциальная позиция, в пользу которой аргументировал Исаак Ньютон, состоит в том, что концепция пространства указывает на *объект*, существующий независимо от наличия материи во вселенной; Готтфрид Лейбниц, с другой стороны, утверждал что то, что мы называем пространством — есть продукт нашего разума: набор *отношений* между объектами, не имеющий смысла в их отсутствии. [3, разд. 6.1]

Для реляциониста, материя — источник пространства. Каким образом, тогда, материя может выбирать между различными направлениями, если направления не существуют (сами по себе)? Каким образом частица ‘знает’ что она должна лететь *влево*, если *лево* не существует пока она не полетит?<sup>4</sup> ///

### 1.3.3 Т-симметрия

Под операцией отражения времени понимается отражение «направления движения», т.е. смена знака импульса частицы (при сохранении координаты). В квантовой физике, отражению времени соответствует (анти-унитарный) оператор  $T$ , определяемый как

$$T|\vec{p}, s, q\rangle = \eta_T|-\vec{p}, -s, q\rangle, \quad |\eta_T|^2 = 1.$$

$T$ -симметрия ( $[T, \mathcal{S}] = 0$ ) обеспечивает

$$\mathcal{S}_{fi} = \eta_T(f)\eta_T(i)^*\mathcal{S}_{fTi_T}.$$

Для процесса  $i \rightarrow f$ ,  $T$ -симметрия записывается как  $\mathcal{T}_{fTi_T} = \mathcal{T}_{if}$ . Матрица перехода удовлетворяет уравнению

$$|\mathcal{T}_{if}|^2 = |\mathcal{T}_{fi}|^2 - 2\text{Im}[\mathcal{I}_{fi}\mathcal{T}_{fi}] - |\mathcal{I}_{fi}|^2,$$

где  $\mathcal{I}$  описывает состояния между  $i$  и  $f$ ; и следовательно

$$|\mathcal{T}_{fTi_T}|^2 - |\mathcal{T}_{fi}|^2 = |\mathcal{T}_{fTi_T}|^2 - |\mathcal{T}_{if}|^2 - 2\text{Im}[\mathcal{I}_{fi}\mathcal{T}_{fi}] - |\mathcal{I}_{fi}|^2.$$

В зависимости от того есть/нет взаимодействия частиц в конечном состоянии,  $\mathcal{I}_{fi}$  не-/равно нулю, и  $T$ -нечётные наблюдаемые не-/имеют нулевое математическое ожидание. В связи с этим, наличие  $T$ -нечётных слагаемых (таких как  $\vec{S} \cdot (\vec{p}_1 \times \vec{p}_2)$ ) в Гамильтониане системы не может само по себе свидетельствовать о нарушении  $T$ -симметрии. [2, стр. 146]

---

<sup>4</sup>Автор этой работы не понимает в чём проблема. Электрон может и не знает лево-право, но он знает куда смотрит *спин*.

## 1.4 CPT-теорема

$CPT$ -преобразование появляется при рассмотрении обращения 4-вектора, которое можно произвести с помощью преобразования Лоренца (являющегося симметрией, на сколько известно на данный момент). Интуитивно,  $PT$ -преобразование также должно быть эквивалентно обращению пространства-времени, однако это не так; таковым является *произведение* преобразований  $C$ ,  $P$  и  $T$  (в любом порядке) –  $CPT$ , являющееся, к тому же, симметрией, по теореме CPT.

CPT-теорема требует того, чтобы при нарушении хотя бы одной из  $C$ ,  $P$  или  $T$  симметрий, по крайней мере ещё одна так же должна нарушиться.

## 2 Эксперименты по проверке симметрий

Наиболее прямой способ проверки дискретной симметрии (коими являются  $C$ ,  $P$ ,  $T$ ) – проведение двух экспериментов, инвертированных друг относительно друга с точки зрения исследуемого преобразования. Свидетельством нарушения симметрии может быть наблюдения ненулевой величины среднего значения *нечётной* наблюдаемой, при соответствующем преобразовании. [2, стр. 12]

В связи с фундаментальной важностью данного понятия в современной науке, эксперименты по проверке нарушения симметрий производятся по всему миру, со всё более совершенной аппаратурой и методами измерения. Некоторые из этих экспериментов рассматриваются далее.

### 2.1 P-инвариантность

Идея тестирования  $P$ -симметрии появилась в связи с невозможностью объяснения распадов в некоторых системах  $K$ -мезонов, в предположении о верности  $P$ -симметрии; так называемый  $\tau - \theta$  парадокс. [2, стр. 43]

Теоретики Ли и Янг заключили отсутствие экспериментальных данных в отношении того, сохраняется ли чётность при слабых взаимодействиях.[4] Для проверки этого, Цзяньсюн Ву провела эксперимент по  $\beta$ -распаду  $^{60}\text{Co}$  (реакция  $^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e + 2\gamma$ ) в котором сравнивались распределения направления излучения электронов и фотонов.[5]

Излучение фотонов – электромагнитный процесс, и следовательно – сохраняющий чётность; к тому же, гамма лучи взаимодействуют с электронами через слабое взаимодействие. Если бы электроны всегда излучались в том же направлении и количестве что и фотоны, можно было бы заключить сохранение чётности в слабых взаимодействиях. Если же распределения электронов и фотонов были бы разными – чётность нарушалась.

В результате эксперимента была установлена не только разница между направлениями излучений электронов и фотонов, но и то, что электроны излучались преимущественно в направлении, противоположном спину ядра: нарушение  $P$ -симметрии в слабых взаимодействиях максимально. За экспериментальное доказательство нарушения чётности и значимый вклад в физику высоких энергий и Стандартной Модели, Ли и Янг были награждены Нобелевской премией по физике в 1957 году; госпожа Ву получила премию Вольфа в 1978 году.

В 1991 году, эксперимент нарушения чётности в сильных взаимодействиях проводился с поляризованным рассеиванием  $pp$  [6]. Нарушение было зафиксировано на уровне  $10^{-7}$  – что соответствует предсказанию нарушения симметрии засчёт (сопутствующих) слабых взаимодействий, – при систематических ошибках на уровне  $10^{-8}$ .

$P$ -симметрия была первой, чьё нарушение было зафиксировано.

## 2.2 С-инвариантность

Коллаборацией WASA-at-COSY проводилось изучение нарушения  $C$ -симметрии в  $dd$ -соударениях. [7] При рассеянии дейтона на дейтоне, одной из возможных реакций является  $dd \rightarrow {}^4\text{He} \pi^0$ , по наблюдению сечения которой можно судить о нарушении  $C$ -симметрии в сильном взаимодействии. В силу закона сохранения изотопического спина, сечение этой реакции должно быть подавлено. Поскольку  $C$ -симметрия является следствием закона сохранения изотопического спина, наблюдение ненулевого сечения этой реакции свидетельствует о нарушении симметрии сопряжения знака.

В эксперименте, дейтронный пучок с моментом 1.2 ГэВ/с рассеивался на замороженных дейтериевых гранулах; средствами детекторов установки WASA идентифицировались вылетающие атомы  ${}^4\text{He}$  (использовался передний детектор) и пары фотонов (центральный детектор), образующихся при распаде  $\pi^0$ -мезона. Передний детектор состоит из нескольких слоёв пластиковых сцинтилляторов, а так же из набора трубок



для отслеживания трэков частиц. Частью центрального детектора, которая детектирует фотонные пары, является сцинтилляторный электромагнитный калориметр. [8]

Проблема интерпретации полученных в эксперименте результатов (полное сечение на уровне 100 пб) заключается в схожести начальных условий исследуемой реакции, и реакции  $dd \rightarrow {}^3\text{He} n \pi^0$ , которая не запрещена  $C$ -симметрией и является основным каналом фона для исследуемой реакции.

## 2.3 $T$ -инвариантность

Эксперименты по нарушению  $T$ -симметрии, как правило, заключаются в измерении асимметрии реакции при обращении какой-либо величины (такой как поляризация), таким образом, чтобы получившаяся реакция была эквивалентна временному обращению изначальной.

Прямым тестом нарушения  $T$ -симметрии в слабых взаимодействиях является эксперимент CPLEAR, в котором проводилось изучение каонных систем. [9] Исследовалась аннигиляция  $\bar{p}p \rightarrow K^+ \pi^- \bar{K}^0$  или  $K^- \pi^+ K^0$ . Детектируя заряженные продукты реакции, и их временную эволюцию, можно вычислить изначальную странность произведённых нейтральных каонов. После производства, каоны свободно распадались под действием слабого взаимодействия. Сравнивая количество каонов, превратившихся в антикаоны, и наоборот, можно вычислить временную асимметрию: если  $T$ -симметрия верна, количество превращений в одну сторону должно быть одинаково количеству превращений в другую. В CPLEAR было обнаружено несовпадение количеств этих реакций, такое, что временная асимметрия вычислена с точностью  $6.6 \cdot 10^{-3}$ .

В 2012 году, BaBar-коллаборация произвели прямое наблюдение нарушения  $T$ -инвариантности при деградации запутанных квантовых состояний нейтральных В-мезонов, в состоянии с определённым ароматом. Измеренные параметры  $T$ -нарушения –  $\Delta S_T^+$  и  $\Delta S_T^-$ , – при предположении Гауссового распределения ошибок, соответствуют 14 стандартным отклонениям от нуля, что является статистически значимым наблюдением нарушения  $T$ -симметрии. [10] Значение нарушения  $T$ -симметрии полученное в BaBar согласуется со стандартной моделью элементарных частиц и результатами CPLEAR.

### 3 TRIC: истинный нуль эксперимент

При изучении ядерных взаимодействий, существует три возможности проверки временной инвариантности [12]: i) сравнение величин в прямой, и обращённой во времени реакциями; ii) вместо обращённой реакции можно использовать *время-сопряжённую*, то есть такую, которая обращается в прямую реакции при обращении времени; iii) можно попытаться измерить значение величины, которая равна нулю при Т-симметрии.

Первые два типа экспериментов сильно ограничены в точности: в первом случае это связано с невозможностью провести прямую и обращённую реакции на одной и той же инструментальной базе, а иногда и ускорителе, в то время как во втором необходимо сравнивать разные величины. Третий тип эксперимента, хотя и колло-сально превосходящий первые два в точности,<sup>5</sup> ранее считался невозможным. В 1985 году, коллаборацией трёх американских теоретиков<sup>6</sup>, была доказана [12] невозможность однозначной интерпретации результатов эксперимента *только* на основании структуры реакции и законов сохранения, без дополнительных предположений о её динамике.

Результат теоремы следует из того, что любая наблюдаемая (билинейная относительно амплитуд вероятности) не может обращаться в ноль *в принципе*, вне зависимости от статуса временной симметрии; однако, как было отмечено авторами статьи, существует одно уникальное отношение, которое, в одном уникальном случае, связывает билинейную наблюдаемую с линейной.

В 1990 году, на основании оптической теоремы, теоретик из национальной лаборатории Лоренца (Беркли, Калифорния), Гомер Конзетт, доказал [13] существование нуль-наблюдаемых для тестов Т-инвариантности. В качестве наблюдаемой Конзетт предложил использовать величину асимметрии сечения взаимодействия между векторно-поляризованными частицами со спином  $1/2$  и тензорно-поляризованными частицами со спином 1. Полное сечение рассеяния в этой реакции не нарушает Р-симметрию, и не зависит от динамики процесса, таким образом составляя основу истинного нуль-эксперимента временной инвариантности в системе барионов.

В этом и заключается физическая суть эксперимента TRIC (Time Reversal Invariance at COSY), вторая итерация которого на синхротроне COSY (в исследовательском центре города Юлих, Германия), планируется на данный момент.

---

<sup>5</sup>Возможный выигрыш варьируется от двух до четырёх порядков величины.

<sup>6</sup>Фирузом Арашем, Майклом Моравскиком, и Гэри Голдстином.

## Список литературы

- [1] Brading, Katherine, and Elena Castellani. “Symmetry and Symmetry Breaking.” In The Stanford Encyclopedia of Philosophy, edited by Edward N. Zalta, Spring 2013., 2013. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2013/entries/symmetry-breaking/>.
- [2] Marco S. Sozzi, DISCRETE SYMMETRIES AND CP VIOLATION. University of Pisa, 2008
- [3] Huggett, Nick, and Carl Hoefer. “Absolute and Relational Theories of Space and Motion.” In The Stanford Encyclopedia of Philosophy, edited by Edward N. Zalta, Spring 2015., 2015. <http://plato.stanford.edu/archives/spr2015/entries/spacetime-theories/>
- [4] T. D. Lee, C. N. Yang, QUESTION OF PARITY CONSERVATION IN WEAK INTERACTIONS. Phys. Rev. 104 (1956) 254–258.
- [5] C. S. Wu, E. Ambler et al., EXPERIMENTAL TEST OF PARITY CONSERVATION IN BETA DECAY. Phys. Rev. 105 (1957) 1423–1415.
- [6] P. D. Eversheim et al., PARITY VIOLATION IN PROTON PROTON SCATTERING AT 13.6 MEV. Phys. Lett. B 256 (1991) 11-14.
- [7] P. Adlarson, W Augustyniak, W. Bardan et al., CHARGE SYMMETRY BREAKING IN  $dd \rightarrow {}^4\text{He}\pi^0$  WITH WASA-AT-COSY. Phys. Lett. B 739 (2014) 44–49.
- [8] P. Adlarson, W Augustyniak, W. Bardan et al., INVESTIGATION OF THE  $dd \rightarrow {}^3\text{He}n\pi^0$  REACTION WITH THE FZ JÜLICH WASA-AT-COSY FACILITY. Phys. Rev. C 88 (2013) 014004.
- [9] A. Angelopoulos et al., PHYSICS AT CPLEAR. Phys. Rep. 374 (2003) 165–270.
- [10] J. P. Lees, V. Poireau, V. Tisserand et al., OBSERVATION OF TIME-REVERSAL VIOLATION IN THE  $B^0$  MESON SYSTEM. Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 211801
- [11] R. Beck, P.D. Eversheim, F. Hinterberger et al., Cosy Proposal # 215: TEST OF TIME-REVERSAL INVARIANCE IN PROTON-DEUTERON SCATTERING AT COSY. Helmholtz Institut für Strahlen- und Kernphysik, University Bonn, Germany.
- [12] Arash, Firooz, Michael J. Moravcsik, and Gary R. Goldstein. “Dynamics-Independent Null Experiment for Testing Time-Reversal Invariance.” Physical Review Letters 54,

- no. 25 (1985): 2649. <https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.54.2649>
- [13] Homer E. Conzett. “On Null Tests of Time-Reversal Invariance,” 6. Paris, France, 1990. <https://publications.lbl.gov/islandora/object/ir%3A93728/datastream/PDF/download/citation.pdf>
- [14] A. Lehrach, U. Bechstedt, J. Dietrich et al., ACCELERATION OF THE POLARIZED PROTON BEAM IN THE COOLER SYNCHROTRON COSY. Proc. of PAC’99, New York City, 1999.