

Е.С. Чувашева

Сложность и симметрия

В данной статье нас будет интересовать вопрос о связи между симметрией и сложностью теоретического описания мира. Анализируя его, можно сказать, что роль симметрии и нарушения симметрии в отношении сложности теоретической реконструкции мира различна. Как показывает история стандартной модели физики частиц, упрощение теоретического описания мира частиц (сокращение числа фундаментальных частиц и сущностей) было связано с введением новых групп симметрий. Нарушение симметрий, напротив, вело к увеличению многообразия и разнообразия мира, т. е. к его усложнению. Но начнём по порядку.

В современной физике под симметрией понимают инвариантность относительно некоторых преобразований (отражений в плоскости, параллельного переноса, перемены частиц местами и т. д.). Под это определение попадают геометрические симметрии – например, равнобедренный треугольник симметричен относительно прямой, содержащей его высоту, потому что при отражении относительно этой прямой он не меняется. Также под это определение подходят более абстрактные симметрии, например, инвариантность уравнений относительно некоторых преобразований. Так, уравнения классической механики симметричны относительно преобразований Галилея. Это означает, что они не меняют своего вида при переходе от данной инерциальной системы отсчёта к другой.

Считается (Ю.Вигнер), что симметрии более фундаментальны, чем законы природы; различные принципы инвариантности представляют собой структуру законов природы. Отношение между фундаментальными симметриями и фундаментальными физическими законами аналогично отношению между фундаментальными и эмпирическими законами: первые являются общим основанием и объяснением для последних. Более того, фундаментальные симметрии пространства и времени делают возможной науку вообще: они лежат в основе повторяемости эксперимента, которая, как известно, является одним из главных критериев истинности в физике. Если явление нельзя повторить в другом месте в другой момент времени, нельзя считать, что оно указывает на какой-то закон природы. Но в основании такой проверки лежит симметрия пространства и времени – равноправие всех точек пространства и моментов времени¹. Более того, согласно теореме Нётер, для каждого непрерывного преобразования физической системы, не меняющего саму систему (другими словами, для каждой непрерывной симметрии системы), можно найти закон сохранения некоторой величины. В соответствии с теоремой Нётер, в классической механике из однородности и изотропности пространства и однородности времени можно получить законы сохранения импульса, момента импульса и энергии соответственно. Симметрии лежат в основе законов сохранения.

Есть явления, при которых симметрия системы теряется. Например, гладкий шарик, лежащий на гладкой симметричной горке, скатывается с неё в определённом направлении, которое, казалось бы, ничем не лучше и не хуже любого другого. На первый взгляд, направление было выбрано случайным образом. В данном случае «нарушение» симметрии можно объяснить тем, что реальные шарик и горка не являются идеально гладкими, т. е. никакой симметрии не было изначально и на самом деле ничего не нарушилось. В классической механике случайности вообще исключены, а всё, что кажется случайным на первый взгляд, объясняется тем, что мы недостаточно хорошо контролируем систему: в силу ограниченности наших возможностей мы не можем разглядеть асимметрию горки или шарика.

¹ Вигнер Е. Этюды о симметрии. 1970. С. 36.

Однако есть явления, которые нельзя так легко объяснить. Нарушение симметрии в таких случаях считается действительно спонтанным: не видно причин, которые с необходимостью привели бы к выбору одного из равнозначных вариантов. Так, на начальных этапах формирования Вселенной произошло разделение слабого и электромагнитного взаимодействий. Результатом этого разделения стала заметная разница в количестве материи и антиматерии. Здесь нет асимметрии, присущей системе изначально, и нет асимметричного внешнего воздействия, которое могло бы вызвать такой эффект. Новая физика XX в., допускающая случайность в своей онтологии, позволяет считать это нарушение симметрии спонтанным.

Существует понятие, применимое к некоторым случаям нарушения симметрии: диссимметрия – некоторое отступление от симметрии, асимметрия внутри симметрии, утрата некоторых элементов симметрии, частичное исчезновение симметрии. Диссимметрия характерна для живых организмов: так, полушария мозга при кажущейся симметрии выполняют разные роли. Не-что подобное наблюдается и в мире элементарных частиц: симметрия существует, но частично нарушена. К этому вопросу мы вернёмся позже.

Нарушение симметрии обладает не меньшим значением, чем принцип симметрии, описанный выше. Оно так же фундаментально в онтологическом и эпистемологическом смысле. Онтологическое значение принципа нарушения симметрии состоит в том, что он ответствен за разнообразие и многообразие явлений мира. В физике рассматриваются четыре фундаментальных взаимодействия: гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное. Они появились благодаря спонтанному нарушению симметрии в первые моменты существования Вселенной. Современные космологические теории рассматривают эволюцию Вселенной, начиная с так называемого планковского момента, $5,4 \cdot 10^{-44}$ с. Сразу после планковского момента единое поле, обладавшее наибольшей симметрией, распалось, от него отделилась гравитация. Интервал 10^{-43} – 10^{-36} с соответствует эпохе Великого объединения трёх других взаимодействий – сильного, слабого и электромагнитного. После этого отделяется сильное, а в момент 10^{-10} с разделяются электромагнитное и слабое взаимодействия (другими словами, рушится

электрослабая симметрия). Без спонтанного нарушения симметрии не произошло бы разделения единого поля на разные взаимодействия, определяющие облик Вселенной на данный момент.

Нарушение симметрии делает мир более сложным. Как мы видим, вместо единого взаимодействия в результате нарушений симметрии появилось четыре разных взаимодействия. Обнаружение какой-либо симметрии, напротив, позволяет упростить картину мира, упорядочить, найти общую основу явлений. С помощью теории групп, формально описывающей преобразования симметрии, удалось объединить адроны в так называемые мультиплеты (Гелл-Манн, 1961). Впоследствии открытие мультиплетов позволило выдвинуть гипотезу о кварках. В онтологическом смысле симметрии отражают фундаментальные закономерности, которые, как считается, должны быть относительно просты. Интересно, что благодаря классификации адронов на основе теории групп удалось открыть новые частицы, без которых мультиплеты были бы неполными. На эпистемологическом уровне они помогают упорядочить знание, свести разнообразные явления к общим закономерностям, т. е. упростить его.

Принцип симметрии играет эвристическую роль в научном познании. Он позволяет открывать новые законы природы (похожим образом из физических законов природы получают новые частные эмпирические закономерности, прежде неизвестные). «Всякое усложнение наших теорий, не запрещённое какой-либо симметрией... происходит на самом деле» (С.Вайнберг)². Важность этого утверждения хорошо просматривается в случае с открытием уравнений поля общей теории относительности. Уравнения поля, первоначально полученные Эйнштейном, не давали решений, при которых Вселенная была бы статична, в соответствии с представлениями того времени. Пришлось ввести слагаемое, включающее в себя некоторую постоянную, названную космологической. Позже выяснилось, что вселенная на самом деле не статична и галактики разлетаются. Эйнштейн сожалел, что «испортил» свои уравнения, ведь они должны быть наиболее простыми из возможных. Но есть причины не считать космологическую постоянную ненужным усложнением. Здесь вступает в силу аргумент о том, что любое усложнение теории, соответствующее фундаменталь-

² Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. М., 2004. С. 176.

ным симметриям, может оказаться верным. «Есть одно-единственное слагаемое, которое можно добавить в уравнения поля общей теории относительности без нарушения фундаментальных принципов симметрии этой теории и которое будет важно в космологических масштабах, – это слагаемое, включающее космологическую постоянную»³. Учёт принципа симметрии меняет отношение к космологической постоянной: Эйнштейн вовсе не «испортил» свои уравнения введением дополнительного слагаемого. Более того, в случае с космологической постоянной благодаря принципу симметрии было подкорректировано представление о простоте в данной теории.

Ещё Аристотель отмечал, что необходимо различать «более явное для нас» и «более явное по природе»⁴. В данном случае принцип симметрии позволил осуществить этот переход – от того, что кажется естественным нам, к тому, что является естественным на самом деле. Простота теории, как выяснилось, заключается в другом – в соблюдении фундаментальной симметрии, следствие же из этой симметрии оказалось несколько более сложным, чем ожидалось.

Вигнер объясняет эвристическую эффективность принципа симметрии тем, что симметрии являются структурой законов природы. Если физические законы позволяют проследить структуру, стоящую за явлениями, то принципы симметрии играют такую же роль для законов природы. По словам Вигнера, «законы природы обладают структурой, называемой нами принципом инвариантности. В некоторых случаях эта структура простирается настолько далеко, что позволяет находить новые законы природы на основе постулата о том, что законы должны обладать определённой инвариантностью»⁵. Известно, что общая теория относительности появилась в том числе благодаря тому, что симметрии уравнений Максвелла не соответствовали галилеевской относительности. Преобразования Лоренца были впервые получены как оставляющие инвариантными уравнения Максвелла.

Принцип нарушения симметрии также играет эвристическую роль, хотя и в несколько другом отношении: при открытии нарушения какой-либо фундаментальной симметрии производятся по-

³ Вайнберг С. Мечты об окончательной теории. С. 176.

⁴ Аристотель. Физика // Аристотель. Соч.: В 4 т. Т. 3. М., 1981. С. 61.

⁵ Вигнер Е. Этюды о симметрии. С. 36.

пытки найти симметрию более высокого уровня. Так произошло с нарушением P - и CP -симметрии. Сначала Ц.Ли и Ч.Янгом было обнаружено, что лагранжиан слабого взаимодействия не инвариантен относительно отражения координат. Можно показать, что это преобразование связано с отражением в плоскости. Неинвариантность лагранжиана означает, что в некоторых процессах слабого взаимодействия может нарушаться симметрия отражения относительно плоскости: могут существовать процессы, зеркально симметричные которым невозможны, или изначально симметричная система может изменяться, теряя зеркальную симметрию. Природа не обладает зеркальной, или **P -симметрией**. Как выяснилось позже, такие процессы действительно существуют. Нарушение зеркальной симметрии было найдено в распаде ядра кобальта. Физикам трудно было отказаться от такой давней и плодотворной идеализации, как зеркальная симметрия природы, и это было стимулом для поиска другой, сходной с ней симметрии. Решение было найдено – должна сохраняться не просто симметрия относительно отражения в плоскости (P -симметрия), нужно также менять знак заряда частиц (**CP -симметрия**). **Процесс, зеркальный распаду кобальта, не существует, но процесс, полученный зеркальным отражением и заменой частиц на античастицы, должен существовать.** Однако, в распаде нейтральных каонов было обнаружено нарушение и этой симметрии. На данный момент сохраняющейся считается симметрия CPT , соответствующая отражению в плоскости, замене частиц на античастицы и обращению времени.

Приведём ещё один любопытный пример, связанный с эвристической ролью нарушения симметрии. CPT -теорема является следствием фундаментальных положений теории поля, и нарушение данной инвариантности, если таковое будет когда-либо обнаружено, укажет на проблемы в основаниях физики. Так, придётся усомниться в принятых представлениях о причинности, связи спина со статистикой, даже в лоренц-инвариантности. Но пока не было обнаружено ни одного процесса, в котором CPT -инвариантность была бы нарушена.

В эпистемологическом плане принцип нарушения симметрии является объяснительным принципом высокого уровня: если законы природы объясняют, как устроен мир, принцип нарушения симметрии объясняет, почему так устроены эти законы. С помощью

этого принципа фактически предпринимается попытка обоснования законов природы. Выше уже говорилось, что симметрия стоит над законами природы в иерархии знания о мире. То же мы видим и здесь. Лагранжиан слабого взаимодействия не инвариантен относительно отражения координат или, что то же самое, отражения в плоскости. Он выражает асимметрию слабого взаимодействия, а почему слабое взаимодействие асимметрично и почему лагранжиан обладает такими свойствами – на это даёт ответ принцип нарушения симметрии в слабом взаимодействии.

Нарушением симметрии объясняется и преобладание вещества над антивеществом. На ранних этапах эволюции Вселенной количество вещества равнялось количеству антивещества. Куда потом пропало антивещество? Именно из вещества образовались галактики, звёзды, жизнь. Если бы в определённый момент этот дисбаланс не появился, вещество и антивещество проаннигилировали бы и не смогли бы образовать сколько-нибудь сложные структуры. Современная физика объясняет это таким образом. На ранних этапах существования Вселенной энергия частиц была достаточна для образования X - и Y -бозонов (и их античастиц) – переносчиков сил Великого объединения. Отдельные распады этих бозонов происходят с нарушением CP -инвариантности, в результате чего вещества появляется больше, чем антивещества. Часть вещества проаннигилировала с антивеществом, а то, что осталось, участвовало в дальнейшей эволюции Вселенной.

Однако следует отметить, что эффекты, описываемые стандартной моделью, слишком слабы, чтобы обеспечить необходимое преобладание вещества над антивеществом. Объяснение через нарушение CP -симметрии хорошо вписывается в физическую картину мира, поэтому есть тенденции сохранять его: считаем, что дисбаланс между материей и антиматерией появился благодаря нарушению CP -симметрии, но конкретный механизм мы понимаем неправильно. Целью эксперимента LHCb на Большом адронном коллайдере является как раз прояснение вопросов, связанных с нарушением CP -инвариантности. Полученные данные, возможно, подведут физиков к более правильному пониманию механизма появления дисбаланса между материей и антиматерией. По результатам эксперимента LHCb, в распаде D^0 -мезонов и анти- D^0 -мезонов CP -инвариантность нарушается сильнее, чем предсказывает стан-

дартная модель. Эти результаты указывают на недочёты в понимании нарушения **CP-инвариантности**. Возможно, они помогут лучше понять механизм, обеспечивший преобладание вещества над антивеществом. Тем не менее это предварительные результаты. Чтобы убедиться в их достоверности, понадобится время⁶.

С нарушением симметрии также связано и появление у частиц массы при прохождении Вселенной моментов спонтанного нарушения симметрии (при разделении взаимодействий). Кварки, лептоны и промежуточные бозоны приобрели массу благодаря нарушению электрослабой симметрии, которая соблюдается только тогда, когда частицы, участвующие в соответствующем взаимодействии, безмассовы. Чтобы описать, как именно нарушается симметрия, было введено хиггсовское поле, при взаимодействии с которым частицы получают массу. В частности, нарушение симметрии и хиггсовский механизм объясняют, почему у **W- и Z-бозонов, переносчиков слабого взаимодействия**, есть масса, а у переносчика электромагнитного взаимодействия – фотона – массы нет: фотон не взаимодействует с полем Хиггса. Квант этого поля – бозон Хиггса – ещё не был обнаружен. Для доказательства или опровержения его существования в настоящее время проводятся опыты на LHC.

⁶ <http://ria.ru/science/20111116/489863538.html>