

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530.1

**СОБЫТИЯ, ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ И ПРИНЦИПЫ
ИНВАРИАНТНОСТИ *)***Е. Вигнер*

Возможность выступить здесь сегодня — высокая и неожиданная для меня честь. Шесть лет назад здесь выступали Янг и Ли. Они сделали общий обзор принципов симметрии и рассказали, в частности, о своем открытии нарушения закона сохранения четности¹. Не имеет большого смысла повторять то, что они рассказали об истории принципов инвариантности или о моем собственном вкладе в разработку этих принципов, который они, конечно, преувеличили. Вместо этого я хотел бы обсудить общую роль принципов симметрии и инвариантности в физике, как классической, так и современной. Точнее, я хотел бы обсудить соотношение между тремя категориями, которые играют фундаментальную роль во всех естественных науках. Это — события, которые, образно выражаясь, являются сырьем для второй категории — законов природы; к третьей категории относятся принципы симметрии, и я попытаюсь показать, что законы природы служат сырьем для них.

СОБЫТИЯ И ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ

Часто говорят, что цель физики состоит в объяснении законов природы или по крайней мере неодушевленной природы. Но что значит объяснить? Это значит установить несколько простых принципов, которые позволяют описать свойства того, что должно быть объяснено. Если мы понимаем некий предмет, то его поведение (т. е. порождаемые им события) не должно вызывать наше удивление. Мы всегда должны находиться под впечатлением, что иного поведения не могло бы и быть.

Ясно, что в этом смысле физика не претендует на объяснение природы. Фактически большой успех физики связан с ограничением ее целей: она претендует лишь на объяснение регулярностей в поведении предметов. Этот отказ от более широких целей и точное определение той области явлений, для которой можно найти объяснение, теперь представляется нам очевидной необходимостью. В действительности же точное определение понятия объяснимого было, возможно, величайшим открытием, когда-либо сделанным в физике. Найти автора этого открытия или указать точную дату его появления представляется нелегким делом. Кеплер

*) E. P. Wigner, Events, Laws of Nature and Invariance Principles, Science 143 (1964). Лекция, прочитанная 10 декабря 1963 г. при получении Е. Вигнером (совместно с М. Гешперт-Майер и Х. Йенсеном) Нобелевской премии по физике. Перевод А. Т. Филиппова.

все еще пытался найти для величины орбит планет точные правила, аналогичные его законам движения планет. Ньютон же осознал, что физика в течение длительного времени будет иметь дело только с объяснением тех из открытых Кеплером закономерностей, которые мы теперь называем законами Кеплера *).

Законами природы называют те регулярности в явлениях природы, которые пытается раскрыть физика. Это название действительно весьма удачно. Подобно тому как юридические законы регулируют действия и поведение при определенных условиях, но не претендуют на регулирование любых действий и любого поведения, законы физики также определяют поведение изучаемых в ней объектов лишь при некоторых вполне определенных условиях, но в других условиях оставляют большой произвол. Те элементы поведения, которые не определяются законами природы, называются начальными условиями. Последние вместе с законами природы определяют поведение объекта в той степени, в какой это вообще возможно. Если бы было возможно более точное определение, то его следовало бы считать дополнительным начальным условием. Как хорошо известно, до создания квантовой теории верили, что возможно полное описание объекта. Если бы классическая теория была правильной, то совокупность начальных условий и законов природы полностью определяла бы поведение объекта.

Высказанное выше утверждение является определением выражения «начальное условие». Поскольку оно носит несколько необычный характер, я поясню его на примере. Предположим, что нам неизвестно уравнение Ньютона для движения звезд и планет

$$\ddot{\mathbf{r}}_i = G \Sigma' M_j \frac{\mathbf{r}_{ij}}{r_{ij}^3}, \quad \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i, \quad (1)$$

но мы знаем только уравнение, определяющее третью производную координат:

$$\dddot{\mathbf{r}}_i = G \Sigma' M_j \frac{\dot{\mathbf{r}}_{ij} (\mathbf{r}_i \mathbf{r}_{ij}) - 3 \mathbf{r}_{ij} (\dot{\mathbf{r}}_i \mathbf{r}_{ij})}{r_{ij}^5}. \quad (2)$$

В более общем случае, если силы \mathbf{F}_i не гравитационные, вместо (2) следовало бы написать уравнение

$$M_i \ddot{\mathbf{r}}_i = (\dot{\mathbf{r}}_i \text{ grad}) \mathbf{F}_i + \dot{\mathbf{F}}_i. \quad (2a)$$

Начальные условия содержали бы тогда не только \mathbf{r}_i и $\dot{\mathbf{r}}_i$, но также и $\ddot{\mathbf{r}}_i$. Эти данные вместе с «уравнением движения» (уравнение (2)) определили бы будущее поведение системы точно так же, как его определяли начальные условия \mathbf{r}_i и $\dot{\mathbf{r}}_i$ вместе с уравнением (1). То обстоятельство, что начальные условия и законы природы полностью определяют поведение объектов, аналогичным образом выполняется в любой причинной теории.

Удивительным открытием эпохи Ньютона было как раз ясное отделение законов природы от начальных условий. Первые невообразимо точны, о вторых же мы, в сущности, ничего не знаем. Остановимся на минуту на последнем утверждении. Действительно ли нет никаких закономерностей, относящихся к тому, что мы только что назвали начальными условиями?

Это утверждение было бы, безусловно, неверным, если бы мы приняли законы природы (2) и (2a), т. е. если бы мы рассматривали $\ddot{\mathbf{r}}_i$ как часть

*) См., например, книгу А. Кромби ², стр. 316 и далее. Прогресс в понимании сферы объяснимого, начиная с конца XIII в., можно проследить почти по каждой главе этой книги.

начальных условий. В этом случае существовало бы соотношение между элементами начальных условий. Действительно, эту роль играло бы точное соотношение (1). Таким образом, можно поставить только следующий вопрос: существуют ли какие-либо соотношения между теми величинами, которые мы на самом деле рассматриваем как начальные условия? Сформулируем этот вопрос более конструктивно: каким образом мы можем убедиться в том, что нам известны все законы природы, относящиеся к некоторой совокупности явлений? (В противном случае для точного определения поведения объекта нам пришлось бы задавать излишне большое число начальных условий.) Один из способов убедиться в этом — показать, что все начальные условия могут быть выбраны произвольно. Это, однако, невозможно в области очень большого (мы не можем изменить орбиты планет) или в области очень малого (мы не можем точно контролировать поведение атомных частиц). Мне неизвестен другой столь же однозначный критерий, но существует одно заслуживающее упоминания отличительное свойство правильно выбранной, т. е. минимальной, системы начальных условий.

Минимальная система начальных условий не только не допускает никакого точного соотношения между ее элементами, но, наоборот, имеют основания утверждать, что последние являются или когда-то были настолько произвольными, насколько позволяют наложенные извне макроскопические связи. Я хочу пояснить суть дела на примере, который на первый взгляд противоречит высказанному утверждению. Этот пример, однако, наилучшим образом демонстрирует и силу и слабость нашего критерия.

С этой целью вернемся к нашей планетной системе. Выше говорилось, что приближенные регулярности в начальных условиях, т. е. в параметрах орбит, привели Кеплера к рассмотрению, которые Ньютон впоследствии оставил в стороне. Эти регулярности дают очевидный контрпример упомянутому выше тезису. Однако существование регулярности в начальных условиях представляется столь неудовлетворительным, что ощущается необходимость показать, что эти регулярности тем не менее возникли из такой ситуации, в которой не было никаких регулярностей. По-видимому, наиболее интересная попытка в этом направлении принадлежит фон Вейцзекеру³ (см. также работу⁴). Он предположил, что солнечная система первоначально состояла из центральной звезды, окруженной газом, который вращается вокруг нее, а в остальном движется совершенно произвольно. Затем из этого предположения он вывел упомянутые выше закономерности строения планетной системы, известные ныне под названием закона Боде. Вообще, можно попытаться аналогичным образом вывести почти всякое «организованное движение», даже существование жизни. Нужно сознаться, что лишь немногие из подобных объяснений были проведены в подробностях*), но сам факт существования таких объяснений остается знаменательным.

Выше мы рассматривали случаи, когда имелись явные доводы против беспорядочного характера неконтролируемых начальных условий. Мы пытались показать, что вполне организованному характеру этих начальных условий предшествовало такое состояние, в котором неконтролируемые начальные условия были неупорядоченными. Такие ситуации, вообще говоря, исключительны. В большинстве случаев нет причины сомневаться в беспорядочности неконтролируемых или неточно определен-

*) Интересен и хорошо объяснен эффект «фокусирующих столкновений». Он состоит в том, что нейтроны, имеющие весьма большие, но произвольно направленные скорости, после столкновений переходят в состояния с меньшими, но имеющими некое предпочтительное направление скоростями. См. статьи^{5, 6}.

ных начальных условий. Беспорядочный характер этих начальных условий может быть подтвержден правильностью заключений, полученных на основании гипотезы о хаосе. С таким положением сталкиваются в кинетической теории газов и вообще всякий раз, когда описывается процесс, в котором энтропия возрастает. В целом при этом создается впечатление, что, в то время как законы природы сжато выражают красивые и простые регулярности, начальные условия, постольку, поскольку они не контролируются, выражают столь же простую и красивую нерегулярность. Поэтому представляется маловероятным, что некоторые из законов природы останутся незамеченными.

В предшествующем обсуждении законы природы были охарактеризованы как регулярности в поведении объекта. В квантовой теории это естественно: законы квантовой механики можно соответствующим образом сформулировать как корреляции между последовательными наблюдениями над объектом. Эти корреляции и составляют регулярности, даваемые законами квантовой механики *). Утверждения классической теории, т. е. ее уравнения движения, обычно не рассматриваются как корреляции между наблюдениями. Тем не менее верно, что их цель и назначение состоят в том, чтобы описывать такие корреляции. По существу, они являются не чем иным, как сжатым выражением для таких корреляций.

ЗАКОНЫ ПРИРОДЫ И ИНВАРИАНТНОСТЬ

Мы уже не ждем от физики объяснения всех событий, даже макроскопической структуры вселенной; мы стремимся только к открытию законов природы, т. е. регулярностей в событиях. Предыдущий раздел дает основания надеяться на то, что регулярности образуют строго определенную совокупность и четко отделяемы от так называемых начальных условий, в которых имеется существенный элемент беспорядочности. Однако мы далеки от того, чтобы найти эту совокупность. На самом деле, если верно, что существуют точные регулярности, то у нас есть основания полагать, что мы знаем лишь бесконечно малую часть их. Наилучшее доказательство этого утверждения вытекает из факта, упомянутого здесь шесть лет назад Янгом, а именно, из множественности видов взаимодействий. Янг назвал четыре из них — гравитационное, слабое, электромагнитное и сильное, а теперь кажется, что имеются два типа сильных взаимодействий. Все эти взаимодействия играют роль в любом процессе, однако трудно, почти невозможно поверить, что все законы природы должны быть такими сложными, как это подразумевается наличием четырех или пяти видов взаимодействий, между которыми нельзя найти никакой связи и никакой аналогии.

Таким образом, естественно поставить вопрос о существовании сверхпринципа, который находился бы в таком отношении к законам природы, в каком законы природы относятся к событиям. Законы природы позволяют нам предсказывать события на основании знания других событий. Принципы инвариантности должны давать нам возможность устанавливать новые корреляции между событиями на основании знания уже установленных корреляций между событиями. Именно такую роль они и играют. Если установлено, что из существования событий A, B, C, \dots с необходимостью следует появление X , то из существования событий A', B', C', \dots также с необходимостью следует появление X' , если A', B', C', \dots и X' получаются из A, B, C, \dots и X посредством одного

*) См., например, раздел «Что такое вектор состояния» в статье автора ?.

из преобразований инвариантности. Существуют три категории таких преобразований инвариантности:

а) Евклидовы преобразования: штрихованные события происходят в других точках пространства, но расположены по отношению друг к другу так же, как нештрихованные события.

б) Сдвиги времени: штрихованные события происходят в другие моменты времени, но отделены друг от друга такими же промежутками времени, как и соответствующие нештрихованные события.

в) Равномерное движение: штрихованные события невозможно отличить от нештрихованных событий, если их наблюдать в некоторой равномерно движущейся системе координат.

Две первые категории принципов инвариантности всегда считают сами собой разумеющимися. В действительности можно привести доводы в пользу того, что законы природы было бы невозможно обнаружить, если бы они не удовлетворяли некоторым элементарным принципам инвариантности, таким, как принципы категорий а) и б), например, если бы они изменялись от точки к точке или если бы они были разными в разное время. Принцип в) не представляется столь естественным. И действительно, он часто подвергался сомнению. Этот принцип был достижением чрезвычайного значения со стороны Эйнштейна, который восстановил его в своей специальной теории относительности. Однако прежде чем перейти к дальнейшему обсуждению этого вопроса, полезно, быть может, сделать несколько общих замечаний.

Первое примечательное свойство перечисленных принципов инвариантности заключается в том, что все они — геометрические, по крайней мере если основным геометрическим пространством является четырехмерное пространство-время. Под этим я подразумеваю, что преобразования инвариантности не изменяют событий; они могут лишь изменить их положение в пространстве и времени и состояние движения. Нетрудно было бы представить себе принцип инвариантности, в котором, скажем, протоны заменяются на электроны и, наоборот, скорости заменяются на положения и т. д. *).

Второе примечательное свойство рассматриваемых принципов состоит в том, что они являются принципами инвариантности. Это означает, что они предполагают одни и те же заключения для штрихованных предпосылок и для нештрихованных предпосылок. Вполне возможно, что если происходят некоторые события A, B, \dots , то за ними следуют события X_1, X_2, \dots с определенными вероятностями p_1, p_2, \dots . За преобразованными событиями A', B', C', \dots преобразованные следствия X'_1, X'_2, X'_3, \dots могли бы происходить с измененными вероятностями, например,

$$\begin{aligned} p'_1 &= p_1 (1 - p_1 + \sum p_n^1), \\ p'_2 &= p_2 (1 - p_2 + \sum p_n^2), \\ &\dots \dots \dots \end{aligned}$$

Мы, однако, предположим, что это не имеет места и что всегда $p'_i = p_i$.

Эти два свойства были специально отмечены по той причине, что существуют принципы симметрии, называемые перекрестными соотношениями **), которые, по - в и д и м о м у, точны и, безусловно, не

*) Возможность существования принципов инвариантности, в котором скорости заменяются на положения и обратно, была исследована М. Борном ⁸.

**) Перекрестные соотношения были открыты М. Гольдбергером ⁹. Ссылки на последующую литературу см., например, в книге Гольдбергера и Ватсона ¹⁰, гл. 10. Соотношения между различными типами симметрии были рассмотрены в двух недавних статьях автора ¹¹.

зависят от конкретного вида взаимодействия. В этих отношениях они аналогичны (или могут быть аналогичными) геометрическим принципам инвариантности. Отличаются же они от последних тем, что они изменяют события и являются принципами ковариантности, а не принципами инвариантности. Так, например, если полностью известно эффективное сечение рассеяния нейтронов на протонах, то перекрестные соотношения позволяют найти некоторые из эффективных сечений столкновения нейтронов с антипротонами. Столкновения нейтронов с протонами, очевидно, отличаются от столкновений нейтронов с антипротонами, и эффективные сечения последних не равны эффективным сечениям первых, а получаются из них с помощью достаточно громоздкого математического метода. Отсюда явствует, что перекрестные соотношения не следует считать условиями геометрической симметрии, несмотря даже на то, что они не зависят от конкретного вида взаимодействия. Здесь мы более не будем рассматривать их. Подобным же образом мы не будем касаться динамических принципов симметрии, которые описывают симметрии конкретных видов взаимодействий, например, электромагнитных взаимодействий или сильных взаимодействий; эти принципы нельзя сформулировать на языке событий.

По поводу геометрических принципов симметрии следует отметить, что они зависят от того, где проходит граница, отделяющая начальные условия от законов природы.

Так, например, закон природы, выражаемый уравнениями (2) или (2a), полученными из закона Ньютона дифференцированием по времени, инвариантен также и относительно преобразования к равномерно ускоренной системе координат

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}_i + t^2 \mathbf{a}, \quad (3)$$

где \mathbf{a} — произвольный вектор. Разумеется, этот дополнительный принцип не может привести к физическим следствиям, поскольку любые реализуемые (т. е. удовлетворяющие уравнению (1)) начальные условия $\mathbf{r}_i, \dot{\mathbf{r}}_i, \ddot{\mathbf{r}}_i$ преобразуются в нереализуемые начальные условия $\mathbf{r}'_i = \mathbf{r}_i, \dot{\mathbf{r}}'_i = \dot{\mathbf{r}}_i, \ddot{\mathbf{r}}'_i = \ddot{\mathbf{r}}_i + 2\mathbf{a}$.

Выше мы обсуждали принципы симметрии, относящиеся к механике Ньютона или к механике специальной теории относительности. Может возникнуть вопрос, почему не обсуждались значительно более общие и явно геометрические принципы инвариантности общей теории относительности. Причина этого в том, что я, в согласии с взглядами, выраженными В. Фоком*), полагаю, что криволинейные преобразования координат общей теории относительности не принадлежат к числу преобразований инвариантности в рассматриваемом здесь смысле. Эти преобразования принято называть активными (они заменяют события A, B, \dots на события A', B', \dots), и если активные преобразования невозможны, то не существует никакой физически осмысленной инвариантности. Тем не менее простой переход от одной криволинейной системы координат к другой означает просто описание системы на новом языке (redescription, по Мельвину¹⁴); такой переход не изменяет событий и не описывает никакой структуры в законах природы. Последнее не означает, что преобразования общей теории относительности не являются полезным средством при отыскании правильных законов тяготения; их полезность

*) См. книгу В. Фока¹². Уже в 1917 г. Э. Кречман¹³ поставил под сомнение то, что постулат инвариантности по отношению к общим преобразованиям координат носит геометрический характер.

очевидна. Однако, как я предположил в другом месте¹¹, принцип инвариантности, для формулировки которого они служат, отличается от геометрических принципов инвариантности, рассмотренных здесь, и является динамическим принципом инвариантности.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ИНВАРИАНТНОСТИ. ПРИБЛИЖЕННЫЕ ИНВАРИАНТНОСТИ

В двух предыдущих разделах была подчеркнута специфическая природа принципов инвариантности, которые выражают точные корреляции между теми из корреляций между событиями, которые заданы в законах природы. Это немедленно указывает на то применение системы принципов инвариантности, которое в настоящее время, безусловно, наиболее важно, а именно: принципы инвариантности служат пробным камнем для проверки истинности возможных законов природы. Какой-либо закон природы может быть признан истинным лишь в том случае, если определяемые им корреляции согласуются с признанными принципами инвариантности.

Между прочим, с наибольшей ясностью иллюстрирует этот вопрос исходная статья Эйнштейна, из которой развилась его формулировка специальной теории относительности¹⁵. В этой статье Эйнштейн указал на то, что корреляции между событиями одинаковы в любой из координатных систем, равномерно движущихся друг относительно друга, даже если причины, вызывающие эти корреляции, зависят от состояния движения системы координат. Подобным образом Эйнштейн наиболее широко пользовался принципами инвариантности для угадывания правильного вида законов природы. Так, для установления закона тяготения он допустил, что этот закон согласуется с принципами инвариантности, которые он постулировал ранее *). Не менее замечательно современное применение принципов инвариантности в квантовой электродинамике. Последняя не является замкнутой теорией — фактически, она вообще не является теорией в надлежащем смысле, так как ее уравнения противоречат друг другу. Однако эти противоречия можно с приемлемой однозначностью разрешить, если допустить, что ее предсказания согласуются с теорией относительности **). При другом, еще более фундаментальном подходе пытаются аксиоматизировать квантовые теории поля. При этом принципы инвариантности образуют краеугольный камень системы аксиом ***). Я не собираюсь дальше распространяться по поводу этого вопроса, поскольку он часто и красочно обсуждался. В действительности я сам о нем недавно говорил¹¹.

Вероятно, наиболее важная функция принципов инвариантности — служить пробными камнями для законов природы. Но это не единственная их функция. Во многих случаях можно получать некоторые следствия из законов природы, исходя из основных свойств математического аппарата теории и из допущения, что эти законы (знать их точный вид необязательно) согласуются с принципами инвариантности. Лучше всего известный пример такого рода — это вывод законов сохранения импульса, момента импульса и энергии, а также закона движения центра массы с помощью перечисленных выше геометрических принципов инвариантности. Это можно сделать как на основе лагранжева формализма

*) См. ¹⁶. Аналогичные результаты были получены почти одновременно Д. Гильбертом¹⁷.

**) См. статью Ю. Швингера¹⁸, а также книгу С. Швебера¹⁹, гл. 15, где можно найти дальнейшие литературные указания.

***). См. в книге²⁰ лекции А. Уайтмена и многие другие статьи.

в классической механике, так и на основе формализма гильбертова пространства в квантовой механике *). Попутно заметим, что законы сохранения дают единственный известный нам пример всегда выполняющихся корреляций между наблюдениями. Ясно, что законы сохранения, которые выводятся из геометрических принципов инвариантности, имеют более широкие пределы применимости, чем любая конкретная теория, будь то теория тяготения, электромагнитная теория и др., которые в современной физике связаны очень слабо. С другой стороны, связь между принципами инвариантности и законами сохранения (которые в данном отношении включают закон движения центра массы) обсуждалась в литературе часто и исчерпывающе.

В квантовой теории принципы инвариантности позволяют получить еще больше следствий, чем в классической механике. И фактически я впервые заинтересовался принципами инвариантности именно благодаря этому обстоятельству. Причина возрастания эффективности принципов инвариантности в квантовой теории заключается, по существу, в линейной природе положенного в ее основу гильбертова пространства **). В силу этого, исходя из двух векторов состояния, ψ_1 и ψ_2 , можно построить бесконечно много новых векторов состояния

$$\psi = a_1\psi_1 + a_2\psi_2, \quad (4)$$

где a_1 и a_2 — произвольные числа. Подобным образом можно образовать суперпозицию и нескольких, даже бесконечного числа состояний с весьма произвольными коэффициентами. Такая возможность образования суперпозиции состояний никоим образом не представляется естественной с точки зрения физики. В частности, даже если нам известно, как привести систему в состояния ψ_1 и ψ_2 , мы не можем дать рецепт, как привести ее в состояние, задаваемое суперпозицией этих состояний. Этот рецепт, разумеется, должен был бы зависеть от коэффициентов, с которыми данные состояния входят в суперпозицию и, вообще говоря, он неизвестен. Поэтому принцип суперпозиции — это, строго говоря, постулат существования, и очень эффективный и полезный постулат существования.

Для иллюстрации выказанного утверждения заметим, что в классической теории по заданному состоянию, например, по заданной орбите планеты, можно построить другое состояние, т. е. другую орбиту, если произвести вращение исходной орбиты вокруг центра притяжения. Это интересно, но не приводит к каким-либо нетривиальным следствиям. То же самое верно и в квантовой теории. В дополнение к этому, однако, состояния, полученные из данного посредством вращения, можно складывать в силу принципа суперпозиции. Если вращения, которым подвергается исходное состояние, равномерно распределены по всем направлениям и если получающиеся в результате состояния складываются (образуют суперпозицию) с одинаковыми коэффициентами, то получающееся состояние обязательно обладает сферической симметрией. Подобное построение сферически симметричного состояния может не удасться лишь в случае, если суперпозицию приводить к нуль-вектору в гильбертовом пространстве. В последнем случае не получилось бы вообще никакого состояния. В подобной ситуации можно тем не менее выбрать другие коэффициенты (в случае плоскости коэффициенты — $e^{im\varphi}$, где φ — угол поворота исходного состояния), так что результирующее состояние хотя

*) См. ²¹⁻²⁵. Квантовомеханический вывод, предложенный Е. Вигнером ²⁶, приводит также к закону сохранения четности, который, как было показано Янгом и Ли ¹, выполняется лишь приближенно. См. также статью автора ²⁷.

**) Это замечание я впервые слышал от Ч. Янга на праздновании столетия Bryn Mawr-колледжа.

и не будет более сферически-симметричным или в плоском случае — аксиально-симметричным, но будет все еще иметь простые свойства по отношению к вращениям. Эта возможность построения состояний, которые либо имеют полную симметрию относительно вращений, либо достаточно просто преобразуются при вращениях — принципиально новая возможность, возникающая в квантовой теории. С точки зрения общих представлений также весьма удовлетворительно, что простые системы, такие, как атомы, имеют состояния с высокой симметрией.

Принцип суперпозиции позволяет, кроме того, применять симметрию при отражениях. В классической механике, как и в квантовой, всякому допустимому состоянию соответствует допустимое зеркально отраженное состояние. Однако в классической механике из этого факта нельзя вывести никаких существенных следствий. В квантовой механике из первоначального и зеркально отраженного состояний можно образовывать суперпозицию с одинаковыми или с одинаковыми по модулю, но отличающимися знаком коэффициентами. В первом случае результирующее состояние симметрично при отражениях, во втором случае антисимметрично. Замечательное достижение Ли и Янга, упоминавшееся выше¹, состояло как раз в новой интерпретации физической природы одной из операций отражения, а именно операции отражения пространства. Кроме того, они показали, что старая интерпретация не может быть истинной. Рассмотрение операции «обращения времени» требует весьма специальных предосторожностей, поскольку соответствующий оператор антиунитарен. Теоретически эта операция приводит к некоторому новому квантовому числу и к новой классификации частиц²⁷, которые, однако, не применялись на практике.

Мое рассмотрение было бы далеко не полным, если бы я не упомянул о приближенных соотношениях инвариантности. Подобно всем приближенным соотношениям последние могут быть очень точными при некоторых условиях, но значительно нарушаться при других. Соответствующие критические условия могут относиться к состоянию объекта или могут определять тип явления. Наиболее важный пример первого случая дают состояния с небольшими относительными скоростями. В этом случае магнитные поля слабы и направление спинов не влияет на поведение других координат. Мы приходим тогда к понятию связи Рессела — Саундерса в спектроскопии²⁸. Еще более интересным должен быть случай очень высоких скоростей, когда величина массы покоя становится несущественной. К сожалению, этот случай не был обсужден во всех деталях, хотя имеются многообещающие начальные попытки*).

Вероятно, наиболее важная совокупность явлений конкретного вида, для которых имеется больше преобразований инвариантности, чем было перечислено выше, является и весьма общей. Она охватывает все такие явления, как столкновения между атомами, молекулами и ядрами, в которых ответственное за бета-распад слабое взаимодействие не играет роли. Во всех этих случаях операция четности задает правильное преобразование инвариантности. Это относится также и к обычной спектроскопии.

В другом интересном специальном классе явлений электромагнитное взаимодействие играет лишь второстепенную роль. Это делает электрический заряд несущественным, и тогда перестановка нейтрона с протоном,

*) См. работу²⁹. Дополнительные преобразования инвариантности, по-видимому, задает конформная группа. Каннингхэм и Бейтмен³⁰ обнаружили, что уравнения Максвелла в вакууме, т. е. уравнения, описывающие свет, всегда распространяющийся со скоростью c , инвариантны относительно этой группы. Более современное обсуждение см. в работах³¹. В этих статьях указана также дальнейшая литература, относящаяся к этому предмету.

или вообще перестановка любых членов изотопического мультиплета, становится преобразованием инвариантности. Эти и другие конкретные случаи увеличения симметрии приводят к чрезвычайно интересным вопросам, которые к тому же находятся теперь в центре внимания. Однако этот предмет имеет слишком много ответвлений, чтобы его можно было подробно обсудить сегодня.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. C. N. Yang, T. D. Lee, в книге «Les prix de Nobel en 1957», Nobel Foundation, Stockholm, 1958; УФН **66**, 69, 79 (1958).
2. A. Crombie, Augustine to Galileo, Falcon, London, 1952.
3. C. F. von Weizsäcker, Zs. Astrophys. **22**, 319 (1944).
4. S. Chandrasekhar, Revs. Mod. Phys. **18**, 94 (1946).
5. R. H. Silsbee, J. Appl. Phys. **28**, 1246 (1957).
6. C. Lehmann, G. Leibfried, Zs. Phys. **172**, 465 (1963).
7. E. Wigner, Amer. J. Phys. **31**, 6 (1963).
8. M. Born, Nature **141**, 327 (1938); Proc. Roy. Soc. **A165**, 291; **166**, 552 (1938).
9. M. L. Goldberger, Phys. Rev. **99**, 979 (1955); M. Gell-Mann, M. L. Goldberger, Phys. Rev. **96**, 1433 (1954).
10. M. L. Goldberger, K. M. Watson, Collision Theory, J. Wiley, New York, 1964.
11. E. Wigner, Nuovo cimento suppl. (в печати); Phys. Today **17**, 34 (1964) (см. перевод: УФН **83**, 729 (1964)); Progr. Theor. Phys. **11**, 437 (1954).
12. В. А. Фок, Теория пространства, времени и тяготения, 2-е изд., М., Физматгиз, 1962.
13. E. Kretschman, Ann. d. Phys. (Leipzig) **53**, 575 (1917).
14. M. A. Melvin, Revs. Mod. Phys. **32**, 477 (1960).
15. A. Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Ann. d. Phys. (Leipzig) **17**, 891 (1905) (см. перевод в сб. «Принцип относительности», М.—Л., ОНТИ, 1935).
16. A. Einstein, Sitzungber. Preuss. Akad. Wiss., 778, 799, 844 (1915); Ann. d. Phys. (Leipzig) **49**, 769 (1916).
17. D. Hilbert, Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Göttingen, 395 (1915).
18. J. Schwinger, Phys. Rev. **76**, 790 (1949).
19. С. Швебер, Введение в релятивистскую квантовую теорию поля, М., ИЛ, 1963.
20. Les problemes mathematiques de la théorie quantique des champs, Centre National de la recherche scientifique, Paris, 1959.
21. G. Hamel, Zs. Math. Phys. **50**, 1 (1944).
22. G. Herglotz, Ann. d. Phys. **36**, 493 (1911).
23. F. Engel, Nachr. Kgl. Ges. Wiss. Göttingen, 207 (1916).
24. E. Nöther, там же, 235 (1918).
25. E. Bessel-Hagen, Math. Ann. **84**, 258 (1921).
26. E. Wigner, Nachr. Ges. Wiss. Göttingen, 375 (1927).
27. Elementary Particle Physics (F. Gürsey, Ed.), Gordon and Breach, New York, 1964.
28. Е. Вигнер, Теория групп и квантовая механика, М., ИЛ, 1961.
29. H. A. Kastrup, Phys. Letts. **3**, 78 (1962).
30. E. Cunningham, Proc. Lond. Math. Soc. **8**, 77 (1909); H. Bateman, там же **8**, 223 (1910).
31. T. Fulton, F. Rohrlich, L. Witten, Rev. Mod. Phys. **34**, 442 (1962); Y. Murai, Progr. Theor. Phys. **11**, 441 (1954).