

Фундаментальные проблемы физики высоких энергий и принцип симметрии.

Аспирант

Д.С. Блау

Научный руководитель

д.ф-м.н. проф. В.И. Манько

Специальность № 8 (код 01.04.16) – физика ядра и элементарных частиц

РНЦ «Курчатовский Институт», 2008 год.

Введение.

Хотя данный реферат и выполнен в рамках дисциплины "философия", мне бы хотелось подчеркнуть здесь разницу между моим субъективным пониманием понятий "философия" и "метафизика" и отнести этот реферат именно к метафизике. Так, для философии характерны наиболее всеобщие вопросы о таких категориях, как сознание и материя, Бог, человек, бытие, истина, справедливость и красота - так или иначе, все они рассматривают человека и сознание как часть мира. В противоположность этому метафизика (др-греч. *τά μετά τά φυσικά* - "то, что после физики") занимается исследованиями первоначальной природы реальности, бытия и мира как такового. Центральным отделом метафизики является онтология, исследование различных типов вещей (категорий), наличествующих в мире, а также типов отношений между вещами. Результаты такого рода исследований пытаются объяснить понятия, используемые людьми для понимания мира - категории, такие как существование, объект, свойство, время, причинность, вероятность и т.д. Поэтому реферат по философии на научную тему никак не может обойтись без описания научных представлений и понятий, и как следствие во многом становится уже не рефератом по философии, а рефератом по проблемам физики. В данном реферате я постарался рассмотреть основы и принципы физики элементарных частиц в наиболее общем виде, а также вкратце описать применение этих принципов в ходе истории становления физики микромира.

Об элементарности.

Сомнения вызывает само понятие "элементарные" применительно к частицам. Что имеется в виду, когда говорят, что такая-то частица - элементарная? Имеет ли вообще смысл разделение частиц на элементарные и неэлементарные? Гейзенберг в одной из своих статей подчеркивает противоречивость критерия элементарности. Иногда говорят, что для элементарной частицы вводится своя волновая функция и в этом состоит критерий элементарности. Встречается другой критерий: для элементарной частицы характерны значения заряда и спина, не превышающие определенных величин. Но для таких критериев нет никакой общей основы, они по существу произвольны. Они лишены того естественного характера, который Эйнштейн называл "внутренним совершенством" физической теории. Гейзенберг отвергает такие критерии, как, например, стабильность.

Частицы при таком подходе оказываются элементарными или неэлементарными в зависимости от энергии: при одних энергиях частица стабильна, при других она распадается.

Каждая картина мира отличается от других критерием элементарности. Начиная с V века до н. э. и кончая XX веком, существовало представление о бесструктурных неизменных элементах, которые движутся с различной скоростью, создают ансамбли переменной конфигурации, и именно эти изменения - движения частиц (их можно проследить от точки к точке и от мгновения к мгновению) лежат в основе всех процессов природы. С такой точки зрения, бесструктурная частица есть неизменная частица, всякое изменение - это изменение структуры. Теперь представим себе, что и бесструктурные элементы могут изменяться. Значит, изменение в природе не сводится к изменению структуры, к разделению, соединению, вообще перемещению дискретных частей вещества. Частицы аннигилируют, рождаются, частицы одного типа превращаются в частицы другого типа, и маловероятно, чтобы распад частиц был когда-либо объяснен по аналогии с распадом молекул и атомов.

Если такой неструктурный распад окажется исходным, то что считать наиболее элементарным процессом? Что, если движение тождественной себе частицы - макроскопический результат трансмутаций? Что, если субъекты трансмутаций - неструктурных распадов и рождений - это и есть элементы и такой распад служит основой понятия элементарности? Физика еще не может ответить на эти вопросы. Но поставить их можно, хотя бы потому, что они ставились издавна. Если рассматривать науку исторически, то многие идеи, кажущиеся безумными, предстают совсем в ином свете. В V веке до н. э. Демокрит говорил, что все изменения в природе сводятся к перегруппировке бесструктурных и неизменных атомов. Движение тождественных себе элементов - единственное реальное изменение в природе. Но у Аристотеля наряду с движением тождественного себе объекта (фора), были и другие формы движения, в том числе субстанциальные - уничтожение (фтора) и возникновение (генезис). Позднейшее поколение атомистов, Эпикур и его ученики, соединили идеи Демокрита с идеей трансмутаций. Во II веке н. э. Александр Афрозийский писал об эпикурейцах, сторонниках дискретности пространства, времени и движения: "Утверждая, что и величина, и движение, и время состоят из неделимых частиц, они утверждают также, что движущееся тело движется на всем протяжении величины, состоящей из неделимых частиц, а на каждой из входящей в нее неделимых частиц движения нет". А что же есть? Аннигиляция в одной точке и регенерация - в другой, отделенной от исходной минимальным, далее неделимым расстоянием. Движение в смысле фора есть результат фтора-процессов - трансмутаций и регенераций частицы. В этом случае все тела изменяются или исчезают при перегруппировке бесструктурных частиц, а самые частицы изменяются актами трансмутации, не связанной с существованием структурных субчастиц. В этом - критерий их элементарности. Назовем классический, механический критерий элементарности (частица бесструктурна и поэтому стабильна) фора-критерием, а фтора-критерием критерий, при котором частица не имеет структуры, но нестабильна, претерпевает элементарные, не сводимые к механическому распаду трансмутации. В случае гравитационных взаимодействий элементарность частицы определяется целиком ее стабильностью. Здесь применим механический фора-критерий. Гравитационные взаимодействия не приводят к трансмутациям, к фтора-эффектам, к распадам и образованиям частиц. Если бы в природе существовали только гравитационные взаимодействия, мы могли бы обойтись классическим разграничением: элементарные частицы стабильны, неэлементарные ансамбли могут распадаться в классическом смысле. В случае остальных трех взаимодействий, в особенности при больших энергиях становится необходимым фтора-критерий.

Современное состояние физики элементарных частиц.

Изучение физики элементарных частиц или, как ее еще называют, физики высоких энергий преследует целью именно ответить на вопрос о делимости вещества, а также более глубоко понять природу сил, определяющих поведение и взаимодействия элементарных частиц.

Среди первых открытий на пути изучения природы элементарных частиц одно из наиболее интересных заключалось в установлении того факта, что каждая частица обязательно имеет определенный внутренний спин. Пока что нет никакого интуитивного объяснения причины того, что элементарные частицы обладают внутренним спином. Для частицы определенного сорта величина внутреннего спинового углового момента всегда одна и та же. Более того, внутренние спины различных частиц всегда могут быть выражены соответствующим образом через фундаментальную единицу спина, подобно тому как заряды частиц всегда представляют собой определенную сумму единичных зарядов. Фактически, все элементарные частицы можно подразделить на два класса: фермионы - частицы с полуцелыми спинами ($1/2$, $3/2$, $5/2$ и т.д.), и бозоны - частицы, которые обладают целым спином (0 , 1 , 2 , 3 , и т.д.).

В современном представлении о веществе все многообразие частиц сводится к 6 лептонам (электрон, мюон, тау-лептон и соответствующие им нейтрино) и 6 кваркам (u,d,s,c,b,t) - фундаментальным фермионам - которые группируются в так называемые 3 поколения вещества, и 4 типам калибровочных бозонов, отвечающих за 4 фундаментальных взаимодействия: сильному соответствуют глюоны, слабому - W^0 и Z^\pm , электромагнитному - фотон, гравитационному - гравитон (он экспериментально еще не открыт).

Из всех взаимодействий только слабое взаимодействие может менять ароматы кварков и лептонов. Только оно может нарушать три так называемые дискретные симметрии: зарядовую - относительно зарядового сопряжения, т.е. относительно замены всех частиц в некотором процессе на соответствующие античастицы, эту симметрию обозначают С, зеркальную - относительно зеркального отражения, т.е. относительно замены некоторого процесса зеркально отраженным, эту симметрию обозначают Р, временную - относительно обращения времени, т.е. относительно замены некоторого процесса на обратный, эту симметрию обозначают Т. До 1956 г. физики считали эти три симметрии такими же неизменяемыми, как и однородность и изотропию пространства и однородность времени. Однако некоторые странности в распадах странных мезонов навели на подозрение, что это не так, а специально поставленные опыты вскоре обнаружили, что во всех слабых процессах Р- и С-симметрии нарушаются максимально возможным образом. Единственной не нарушенной дискретной симметрией осталась в настоящее время СРТ-симметрия - симметрия относительно произведения всех трех преобразований: С, Р и Т. Заметим, что одной только СТ-симметрии достаточно для того, чтобы были равны друг другу массы частицы и античастицы, а также их времена жизни. Стандартная теория электрослабого взаимодействия основана на так называемой электрослабой симметрии, которой отвечают четыре безмассовых векторных бозона: два заряженных и два нейтральных. В отличие, скажем, от цветовой симметрии, электрослабая симметрия в природе нарушена. В результате этого нарушения остается лишь один безмассовый векторный бозон - фотон. Три остальных бозона: W^0 , Z^+ и Z^- - приобретают массы.

Кроме перечисленных выше частиц, Стандартная Модель предсказывает существование еще одного бозона - Хиггс-бозона, на открытие которого сейчас направлены все усилия ученых в рамках экспериментов на Большом Адронном Коллайдере в ЦЕРНе, который будет запущен летом 2008 года. В современной теоретической физике хиггсовы бозоны

играют очень важную роль. Во-первых, они дают массы лептонам, кваркам и промежуточным бозонам. Во-вторых, они ответственны за различия верхних кварков относительно нижних и существование девяти (а не трех) заряженных кварковых токов. В-третьих, с ними, по-видимому, связано нарушение CP-симметрии и, возможно, P-симметрии в слабых процессах.

Коллайдеры высоких энергий понадобятся и для проверки еще одной теории - суперсимметрии. Суперсимметрия - это симметрия между фермионами и бозонами. Так, согласно простейшему варианту суперсимметрии, у каждой из уже известных частиц есть свой "суперпартнер", спин которого отличается на $1/2$.

В физике элементарных частиц все еще остается много нерешенных проблем. В частности, в отношении кварков остаются вопросы, на которые пока нет ответа:

- почему ровно три цвета
- почему ровно три поколения кварков?
- случайно ли совпадение числа цветов и числа поколений?
- случайно ли совпадение этого числа с размерностью пространства в нашем мире?
- откуда берётся такой разброс в массах кварков?

О симметрии в физике элементарных частиц.

По мере развития физики микромира непрерывно возрастает роль идей симметрии. Следует учитывать, что математической основой современных теорий различных фундаментальных физических взаимодействий являются соответствующие группы симметрий и их представления. Плодотворность идеи симметрии в полной мере проявилась в первых же ее применениях в физике микромира - в этой области она привела к ряду принципиально новых представлений. Достаточно показателен пример с появлением в физике античастиц. Уже простое объединение квантовой механики со специальной теорией относительности привело П.А. Дирака к выводу, что в природе должны существовать положительно заряженные антиподы электрона - они были названы позитронами и в дальнейшем экспериментально обнаружены. Принципиальное значение этого открытия великолепно отразил В. Гейзенберг, акцентируя внимание на роли идей симметрии: "При этом существенным было отнюдь не открытие еще одной, до того неизвестной частицы - было открыто еще множество частиц без сколько-нибудь серьезных последствий для оснований физики: существенным было открытие новой симметрии, сопряженности частиц-античастиц, тесно связанной с лоренцевой группой специальной теории относительности, а также с превращением кинетической энергии сталкивающихся частиц в массу покоя частиц и обратно".

Если мезоны вполне удовлетворяли требованиям статистики, ибо образованы из частицы и античастицы, у которых различаются квантовые числа, то иная картина получается в случае барионов, часть из которых образовывалась тремя кварками с одинаковыми квантовыми числами (например, uuu , ddd и sss), что несовместимо с принципами запрета. Каждый аромат кварка может существовать в трех различных состояниях, которые характеризуются одинаковыми значениями всех квантовых чисел, а их отличие определяется новым параметром, который имеет как раз три различных значения, - этот параметр получил условное название "цвет".

Все известные принципы симметрии, различающиеся между собой степенью точности, уровнем общности, характером изменений группы, согласно Вигнеру, разделяются на два

больших класса - геометрические и динамические. Геометрические формулируются в терминах самих явлений, устанавливая независимость событий от выбора системы отсчета при соответствующих данной группе преобразованиях. Исходными в этих симметриях являются преобразования пространства и времени. Несомненно, что соответствующей инвариантностью должны обладать и законы, которым подчиняются явления и которые, помимо пространственных и временных переменных, включают и динамические переменные. И, следовательно, геометрические принципы инвариантности включают также преобразования динамических переменных. Но исходным является инвариантность событий относительно преобразований пространства и времени. Это обстоятельство определяет внешний характер геометрических принципов по отношению к законам данной теории. Геометрические принципы связаны с известными законами сохранения - энергии, момента количества движения, импульса, которые являются точными, и с законом сохранения четности, который имеет приближенный характер. Геометрические принципы носят универсальный характер. Динамические принципы не обладают им. Они формулируются в терминах законов природы и относятся к определенным типам взаимодействий, поэтому каждое из известных взаимодействий обладает своей собственной симметрией. С этими принципами также связаны законы сохранения. Но эти законы относятся не к переменным измеряемым физическим характеристикам, но к параметрам, характеризующим взаимодействие, которое обычно называют в некотором обобщенном смысле зарядом. В связи с этим динамические симметрии являются внутренними. Как мы увидим далее, вигнеровская классификация принципов симметрии приобретает существенно новые черты в современной физике частиц.

Функции принципов симметрии в физическом познании.

Принципы симметрии выполняют в физическом познании следующие основные функции.

а) организующая

В известном смысле задача, которую решает физик-теоретик при построении теории, аналогична той, которую решает геометр: дано многообразие, требуется найти группу преобразований, относительно которой инвариантны уравнения теории. Какие бы возражения не выдвигались против программы эрлангизации физики, два момента, связанные с ней представляются бесспорными: а) структура физической теории носит теоретико-групповой характер; б) основные этапы развития физического знания, каждый из которых представляет собой фундаментальную теорию, могут быть связаны с теоретико-групповым расширением. Последнее очевидно, по крайней мере, для такой цепочки теорий: классическая механика - специальная теория относительности - общая теория относительности. Эти теории инвариантны относительно групп преобразований пространственно-временных переменных. Классическая механика является теорией инвариантов относительно преобразований галилей-ньютоновой группы. В основе СТО лежит группа Пуанкаре.

б) ограничительная

Другая функция принципа инвариантности может быть охарактеризована как ограничительная. Она имеет два аспекта - гносеологический и онтологический. В гносеологическом плане принципы симметрии служат своеобразными правилами отбора выдвигаемых уравнений и гипотез. В частности, любая теоретическая система исключается из дальнейшего рассмотрения, если ее релятивистская формулировка оказывается принципиально невозможной. В онтологическом плане ограничительная функция принципов инвариантности состоит в том, что они вычлениают физически

реализуемые состояния из всех логически возможных состояний: физически реализуемыми оказываются состояния, инвариантные относительно группы преобразований, лежащей в основании теорий.

В некотором тривиальном смысле любой закон связан с введением ограничений в поле ожидаемых событий. Но принципы инвариантности накладывают дополнительные ограничения на возможности реализации событий. Следует различать обычные законы, как законы "дозволения" и законы сохранения, тесно связанные с принципами симметрии, как законы запрета. В физике элементарных частиц доказал свою необычайную плодотворность принцип, согласно которому в мире элементарных частиц может происходить все то, что не противоречит законам сохранения. И хотя каждый отдельный закон сохранения накладывает менее жесткие ограничения на возможное поведение элементарных частиц по сравнению с законами дозволения, взятые в системе, они накладывают на априорно возможные особенности поведения элементарных объектов очень жесткие ограничения.

Можно утверждать также, что принципы инвариантности связаны с еще одним типом ограничений. Расширение инвариантных аспектов теории, как правило, влечет за собой уменьшение числа начальных условий, необходимых для описания поведения систем. Постулирование уже самых первых геометрических принципов инвариантности в физике - относительно вращений и сдвигов в пространстве - фактически провозглашало в явной форме иррелевантность для описания поведения физических систем таких начальных условий, как абсолютное положение системы в пространстве и ее ориентация. Да и любой другой принцип симметрии можно сформулировать так, что будет подчеркнута "даруемая" симметрией независимость от тех или иных начальных условий. Так, симметрия относительно зарядового сопряжения означает, что указание на то, имеют ли в реакциях дело с частицей или античастицей, не является начальным условием, необходимым для описания поведения частиц. Сохранение четности говорит о том, что иррелевантным становится указание на то, идет ли речь о системе или ее зеркальном отображении. Расширение группы влечет за собой сокращение числа начальных условий. Переход от группы $SU(2) \times SU(1)$ к группе $SU(2) \times U(1) \times SU(3)$ в значительной степени диктуется стремлением "усовершенствовать" теорию, уменьшив число ее произвольных параметров. В принятой в настоящее время стандартной схеме электрослабых взаимодействий параметр, определяющий отношение констант электромагнитного и слабого взаимодействий (угол Вайнберга) остается внешним для теории. Этот недостаток пытаются ликвидировать на пути расширения группы теории.

в) унифицирующая

Принципы симметрии выполняют роль одного из оснований тенденции физического знания к единству. Для того, чтобы понять, почему именно принципы симметрии могут выполнять такую роль в познании, следует учесть, что понятия "инвариантность", "симметрия", "группа" несут в себе идею тождества, равенства, эквивалентности. Это может быть эквивалентность систем отсчета относительно преобразований пространства и времени (как в геометрических принципах инвариантности), либо состояний физической системы по отношению к преобразованиям фазового пространства, либо тождественность объектов, свойств, параметров систем относительно того или иного типа взаимодействий (как в динамических принципах). Уравнивание, отождествление систем отсчета, объектов в определенном отношении служит основой расширения поля приложения понятий теории, создает основу для экономии теоретических средств, для использования одних и тех же понятий, уравнений для объектов разных классов, разных классов систем отсчета, разных состояний физических систем, т.е. обеспечивает как раз те особенности научных

теорий, которые связаны с их общностью. Унифицирующая функция принципов симметрии становится особенно очевидной, если сопоставить ее с той ролью, которую играют в физическом познании нарушения симметрии. Известно, что все симметрии физики элементарных частиц являются нарушенными. И нарушения симметрии играют самостоятельную роль в теоретической реконструкции мира элементарных частиц, поскольку в противовес симметриям, служащим основанием для поиска единства в многообразии частиц, нарушения симметрии ответственны именно за само многообразие. Так, именно приближенный характер изотопической симметрии (она нарушается электромагнитным взаимодействием) вызывает расщепление мультиплетов, появление различия в массах у членов одного и того же изотопического мультиплета. При "выключении" электромагнитного взаимодействия эти массы были бы равны, что привело бы к тождеству членов изотопического мультиплета, к его "вырождению". Еще более нарушенной является SU(3) не цветовая, что ведет к появлению еще больших различий между различными изомультиплетами - членами унитарных мультиплетов. Только выключение умеренно сильных взаимодействий (нарушающих унитарную симметрию) привело бы к вырождению супермультиплета. Предполагается далее, что спонтанное нарушение локальной изотопической инвариантности (до обычной электромагнитной калибровочной инвариантности) приводит к появлению масс и промежуточных векторных бозонов. И именно это нарушение "повинно" в существовании столь резких различий между электромагнитными и слабыми взаимодействиями. И, наконец, нарушенный характер группы симметрии, кладущейся в основание программы "великого объединения", позволяет объяснить расхождения в значениях констант связи электромагнитного и слабого взаимодействий и существование столь заметного различия между свойствами лептонов и кварков. Таким образом, и симметрия, и нарушения симметрии равным образом необходимы для реконструкции мира элементарных объектов.

Рассмотренные функции принципов симметрии не просто связаны между собой. Они тесно переплетены, и ни одна из них не может быть реализована в изоляции от других. Основанная на действии принципов симметрии унификация знания лежит в основании организующей функции, и в то же время ее действие сопровождается сокращением числа фундаментальных частиц и взаимодействий, т.е. реализацией ограничительной функции. Вычленение физически реализуемых состояний означает и сокращение логически возможных, но физически нереализуемых состояний (ограничительная функция), и одновременно ведет к организации знания в систему - созданию закона, теории.

Если использовать идею разделения симметрий на геометрические и динамические, о которой упоминалось выше, можно утверждать, что на первом этапе ведущую роль играли геометрические симметрии, тогда как использование внутренних симметрий носило в какой-то степени подчиненный характер. На втором этапе, напротив, на первое место выдвигаются именно динамические симметрии, причем, намечается объединение динамических и геометрических симметрий, т.е. сами геометрические симметрии начинают трактоваться как имеющие динамический характер. Это обстоятельство является следствием очень мощной унифицирующей способности симметрий и основанных на них методах.

Применение принципов симметрии в физике элементарных частиц.

Первое применение идеи симметрии в физике элементарных частиц было связано с использованием ее ограничительной функции. Поиски симметрии стимулировали переход, совершенный в 1926 г. О. Клейном, В.А. Фоком и В. Гордоном, от нерелятивистского уравнения Шредингера к релятивистски инвариантному полемому

уравнению. Уравнение Клейна-Гордона представляет собой релятивистски инвариантное выражение для скалярной волновой функции и имеет, соответственно, второй порядок по времени. Это обстоятельство порождает ряд трудностей в интерпретации волновой функции как амплитуды плотности вероятности. Наличие этих трудностей побудило П. Дирака к поиску релятивистски инвариантного уравнения первого порядка, причем исходным пунктом исследования было уравнение Клейна-Гордона. Эта задача была решена Дираком в 1927 году. Уравнение Дирака было получено путем перехода от скалярной полевой переменной к многокомпонентной волновой функции, обладающей более сложными трансформационными (симметричными) свойствами, нежели скаляр. Такая сложная структура называется спинором (точнее биспинором) Дирака. Уравнение Дирака автоматически учитывает наличие у электрона такой внутренней степени свободы, как спин и существование у электрона античастицы - позитрона. Работы Дирака и Майорана вызвали к жизни большую серию работ других физиков, в которых были установлены все возможности для типов линейных релятивистски инвариантных полевых уравнений. Так были изучены векторные полевые уравнения для частиц с конечной массой покоя, а в середине 30-х годов в работах В. Паули, В. Вайскопфа, П. Иордана, Е. Вигнера и ряда других физиков было проведено достаточно полное исследование возможных типов релятивистски инвариантных уравнений различного порядка тензорности. Необходимо отметить, что эти поиски проводились в тесной связи с идеей квантования полей. Т.е. речь шла не просто о классических полевых уравнениях, а о квантовании этих полей и их применении для описания вновь открываемых и предполагаемых (гипотетических) частиц. Среди этих работ нам хотелось бы особо выделить работы Г. Вейля, в которых было рассмотрено релятивистски инвариантное уравнение для безмассовой частицы со спином $1/2$. Это уравнение неинвариантно относительно зеркального отражения пространства. По этой причине на него не обратили внимания, и оно оказалось забытым. Но во втором, послевоенном периоде развития физики элементарных частиц, когда было открыто несохранение четности, это уравнение пережило свое второе рождение. Рассматриваемое выше направление связано с внешними, геометрическими симметриями. Но одновременно в нем развивалось и другое направление, в котором в физику частиц проникали внутренние, динамические симметрии. Одним из существенных путей такого проникновения явилось обнаружение спина электрона. Спин представляет собой внутреннюю степень свободы частицы и, хотя геометрические преобразования затрагивают преобразования спиновой переменной, спиновые характеристики не могут быть полностью выражены только через геометрические свойства. Связь спина с симметрией была быстро обнаружена в работах Б. Ван-дер-Вардена, Э. Картана и ряда других математиков и физиков-теоретиков. Для значения спина $1/2$ спиновые переменные обладают группой симметрии $SU(2)$, изоморфной группе вращений трехмерного пространства $O(3)$. Кроме того, в силу одного из важнейших положений квантовой теории - принципа неразличимости тождественных частиц - группа преобразований спина очень сильно связана с группой перестановок. Понимание спина как внутренней степени свободы послужило отправным моментом в возникновении понятия изотопического спина (изоспина), которому суждено было сыграть фундаментальную роль в дальнейшем развитии физики элементарных частиц. А именно в реализации объединительной функции. Понятие изоспина было введено В. Гейзенбергом в 1932 г. После открытия взаимодействий нейтрона физики обратили внимание на то, что в сильных (ядерных) взаимодействиях протон и нейтрон ведут себя одинаково и что все различия связаны с различием их электрического заряда. На этом основании Гейзенберг выдвинул предположение о том, что протон и нейтрон представляют собой разные состояния одной и той же частицы и что эти состояния соответствуют разным проекциям внутренней степени свободы, которая может иметь лишь две проекции и в этом смысле аналогична спину. Симметрия протона и нейтрона в сильных взаимодействиях получила название изотопической симметрии, причем группой

этой симметрии является группа $SU(2)$, также как и у обычного спина. Эта мысль оказалась первой попыткой объединить разные частицы на основе теоретико-группового подхода.

Пожалуй, еще более тесная связь существует между объединительной функцией принципов симметрии и идеей калибровочных симметрий. Калибровочная инвариантность, как существенная характеристика полевых уравнений, была установлена еще в начале XX века при исследовании трансформационных свойств уравнений Максвелла. Этот тип симметрии имеет специфический внутренний характер, поскольку преобразования этого типа, оставляющие неизменными уравнения движения (или лагранжиан системы), относятся исключительно к динамическим полевым переменным и не включают пространственно-временных преобразований. Смысл этих преобразований в электродинамике состоит в том, что к 4-х мерному вектор-потенциалу электромагнитного поля можно прибавить 4-мерный градиент произвольной функции координат и времени и это не изменяет уравнений Максвелла. Впервые в физике частиц идея калибровочной инвариантности была использована в 1919 г. в работе Г. Вейля, в которой он пытался развить идеи общей теории относительности и объединить гравитационные и электромагнитные взаимодействия. Важно отметить, что уже на этом этапе обнаружилось мощные объединительные возможности калибровочных симметрий.

Дальнейшее развитие идеи калибровочной симметрии в физике частиц проходило уже в рамках квантовой механики, в особенности в сфере активного исследования полевых уравнений в 1926-1929 гг., в работах В.А. Фока, Ф. Лондона и Г. Вейля. Общим свойством квантово-полевых уравнений (Шредингера, Клейна-Гордона) является их инвариантность относительно преобразований умножения волновой функции на фазовый множитель. Для того, чтобы полевое уравнение частицы, взаимодействующей с электромагнитным полем осталось инвариантным при таком преобразовании, нужно чтобы к вектор-потенциалу был прибавлен 4-мерный градиент функции f . Т.е. локальная калибровочная инвариантность очень тесно связана с взаимодействием частиц с векторным полем (бозонной частицей) переносящим это взаимодействие. В этом плане опять-таки обнаруживается объединяющая возможность калибровочной симметрии. Именно с этим обстоятельством связано высказанное Вейлем в 1929 г. положение о весьма общем характере требования калибровочной симметрии.

Таким образом, на первом этапе применения принципа симметрии сложились три основных направления: изучение следствий релятивистской инвариантности уравнений, т.е. геометрической симметрии, и использование внутренних симметрий, изотопической и калибровочной. Каждое из этих направлений получило дальнейшее развитие на следующем этапе, который начался в конце 40-х годов нашего века. В послевоенный период продолжают исследования, связанные с требованием релятивистской инвариантности (ограничительная функция симметрии). Однако на этом этапе на первый план выдвигается новый момент, суть которого в разработке квантовой теории поля. В этом направлении можно отметить два очень важных результата. В начале 50-х годов в работах Ю. Швингера, Р. Фейнмана, С. Томонаги и Ф. Дайсона была создана последовательная релятивистски инвариантная теория возмущений квантовой электродинамики, включая теорию перенормировки. Вторым фундаментальным результатом является установление в работах В. Паули, Г. Людерса и Ю. Швингера связи между релятивистской инвариантностью, спином и типом статистики и знаменитой СРТ-теореме, т.е. инвариантности явлений относительно комбинированного преобразования зарядового сопряжения, зеркального отражения пространства и обращения времени. Оба эти результата оказались важными не только для дальнейшего развития физики элементарных частиц, но и в другом отношении: в определенном смысле они оказались

завершающими в развитии всего направления. После них исследования релятивистской инвариантности оказались законченными и основную роль в развитии физики частиц стали играть внутренние симметрии. Наиболее активно в 50-х годах нашего века в физике элементарных частиц стала использоваться идея изотопической симметрии (объединительная функция инвариантности). Представление о том, что протон и нейтрон могут рассматриваться в качестве разных проекций изотопического спина и на этой основе быть объединены, привело к попыткам более широкого объединения сильно взаимодействующих частиц, число которых (частиц) быстро росло по мере развития экспериментальной техники. Важным аспектом этой объединительной тенденции было стремление рассматривать в качестве фундаментальных лишь небольшое число частиц. Все остальные полагались состоящими из фундаментальных. Роль принципов симметрии в моделях составных частиц очень многогранна. Мы выделим два аспекта. Первый заключается в способности симметрий выступить основой объединения частиц в мультиплеты. Второй - в том, что требования симметрии определяют относительные вероятности распада частиц по различным каналам, причем в соответствии с этими требованиями некоторые распады оказываются вообще запрещенными. Это обстоятельство позволяет проводить сравнение на основе сопоставления с экспериментально наблюдаемыми вероятностями распадов различных групп симметрии, обладающими примерно одинаковыми объединительными возможностями. Наиболее плодотворными в рамках этого направления оказались работы, в которых объединение производилось не на базе дублета изоспиновой симметрии (группа $SU(2)$), а на основе триплета фундаментальных частиц, т.е. переход к группе $SU(3)$. Последовательное развитие этой идеи привело М. Гелл-Манна, Ю. Неемана и Г. Цвейга в 1964 г. к гипотезе кварков, которые представляют собой тройку частиц, преобразующихся по наименьшему неприводимому представлению группы $SU(3)$. В конце 50-х, начале 60-х годов были обнаружены динамические следствия кварковой модели (зависимость форм-факторов рассеяния от кварковой структуры адронов и ряд других следствий). Но наибольшее влияние оказало расширение самой кварковой модели. С одной стороны выяснилось, что простая кварковая модель, в которой существует всего три типа кварков явно недостаточна, и расширение совокупности кварков привело к большим успехам в предсказании новых частиц. С другой стороны, оказалось необходимым ввести новую характеристику кварков - цвет, причем это введение цвета также было связано со свойствами симметрии. Таким образом, в физику частиц вошла новая группа симметрии - цветовая $SU(3)^c$.

Третьим направлением применения идеи симметрии в физике частиц (которое, как было сказано выше, сливается со вторым) является использование калибровочной симметрии. Попытки построения объединительных теорий на основе требования калибровочной симметрии, начавшиеся, как отмечалось, на первом этапе использования идей симметрии в физике частиц, к началу 50-х годов были основательно забыты. Поэтому второй период использования калибровочной симметрии начинается статьей Ч. Янга и Р. Миллса 1954 года. Основной идеей этой работы была констатация существования связи требования калибровочной инвариантности с концепцией взаимодействия частиц как обмена промежуточными бозонами (векторными частицами со спином 1). При этом нужно отметить два важных момента этой пионерской работы. Один из них состоит в том, что в ней в качестве калибровочной рассматривалась именно изотопическая симметрия, и речь сразу шла не о глобальной, а о локальной инвариантности. Таким образом, идеи калибровочной и изотопической симметрии рассматривались в единстве. Вторым важным моментом работы Янга-Миллса является то, что в калибровочном преобразовании функция f является не числовой функцией, как в электродинамике, а матрицей (оператором), точнее говоря, матричным вектором, компоненты которого не коммутируют между собой. Это означало, что совершался переход от абелевой (коммутативной) группы

калибровочных преобразований к неабелевой. Это изменение имело исключительно важное значение для последующего развития теории. Работа Янга и Миллса вызвала к жизни ряд исследований ведущих физиков, в которых делались попытки описания различных взаимодействий (сильных, гравитационных) при помощи теорий, основанных на использовании неабелевой калибровочной симметрии. Особый интерес представляют в этом ряду первые попытки объединения слабого и электромагнитного взаимодействий. Однако до середины 60-х годов прогресс в этой области был не очень существенным. Причиной этого были трудности, с которыми сталкивались калибровочные неабелевы теории взаимодействия. Одна из наиболее существенных трудностей состояла в том, что во всех таких теориях векторные частицы, переносящие взаимодействия, должны быть безмассовыми подобно фотону, являющемуся промежуточной частицей в электродинамике. Тем не менее, в эксперименте была известна только одна такая частица - все тот же фотон. Все остальные бозоны обладают массой. Существенный сдвиг в этом направлении произошел в 1967 г., когда усилиями С. Вайнберга, А. Салама и Л. Глэшоу была создана единая теория электромагнитных и слабых взаимодействий, основанная на идее локальной калибровочной инвариантности относительно группы $SU(2) \times U(1)$, где $SU(2)$ - группа изоспина, характеризующая слабые взаимодействия (неабелева) и $U(1)$ - группа калибровочных преобразований электродинамики (абелева). Исключительно важным моментом в создании этой группы явилось, наряду с использованием идеи симметрии, обращение к противоположной идее - нарушения симметрии, точнее, спонтанного нарушения симметрии. Эта идея зародилась еще в довоенный период в работах В. Гейзенберга, посвященных теории спонтанного упорядочивания спинов в ферромагнетиках. Фундаментальные работы по исследованию свойств квантовых систем со спонтанно нарушенной симметрией были выполнены в начале 60-х годов Дж. Голдстоуном. В период между 1964 и 1967 гг. рядом физиков, исследовавших математическую структуру квантовой теории поля с нарушенной калибровочной симметрией, была открыта возможность появления массы у промежуточных векторных бозонов. Это явление получило название механизма Хиггса. Использование этого механизма позволило Вайнбергу, Саламу и Глэшоу нейтрализовать трудность, связанную с появлением в теории безмассовых промежуточных векторных бозонов, со спином 1. Это касается именно тех бозонов, которые являются переносчиками слабого взаимодействия W^0 и Z^\pm бозонов. Начало 70-х годов знаменуется еще одним важным продвижением в направлении использования идеи калибровочной симметрии. Истолкование цветовой симметрии кварков - $SU(3)^c$ - группы - как локальной калибровочной неабелевой симметрии привела к созданию квантовой хромодинамики - квантовополевой теории кварков и промежуточных векторных переносчиков взаимодействия - глюонов. Таким образом, к концу 70-х гг. в физике элементарных частиц прочно утвердились две теории, основанные на использовании локальной неабелевой калибровочной симметрии - квантовая хромодинамика (группа $SU(3)^c$) и единая теория электрослабых взаимодействий (группа $SU(2) \times U(1)$). Глубокое сходство внутренней структуры этих теорий позволяет надеяться на то, что обе они являются подтеориями некоторой более общей теории, подобно тому, как теории электромагнитных и слабых взаимодействий являются подтеориями единой теории электрослабых взаимодействий. Объединение электрослабых и сильных взаимодействий хотя и очень привлекает внимание физиков, но у них есть еще более впечатляющая цель - объединение всех известных взаимодействий, включая и гравитационное. Надежда на возможность такого объединения связывается с тем, что существует калибровочная трактовка гравитационного взаимодействия. Вместе с тем, здесь есть и существенная трудность. Группа преобразований, с которой связано гравитационное взаимодействие является "геометрической" - внешней симметрией, тогда как симметрии всех остальных взаимодействий являются внутренними, и в начале 70-х гг. были доказаны теоремы о невозможности нетривиального объединения внешних и внутренних симметрий. Есть и

еще один аспект проблемы объединения. Он состоит в том, что все частицы очень резко делятся на фермионы (с полуцелым спином) и бозоны (с целым), и они также не объединяются какой-либо симметрией. Однако, в начале 70-х гг. была обнаружена возможность объединить фермионы и бозоны. Это оказалось возможным на основе расширения пространства, в котором определены полевые переменные, за счет введения некоммутирующих координат, называемых грассмановыми переменными. Такая симметрия получила название суперсимметрии, причем выяснилось, что преобразование фермион-бозон-фермион (или бозон-фермион-бозон) приводит к сдвигу в обычном пространстве. Это означает, что на основе суперсимметрии могут быть объединены внутренние и внешние симметрии, что открывает дорогу к объединению всех взаимодействий (в физике эта программа называется "Великим объединением"). Такова в общих чертах история реализации теоретико-группового подхода в физике элементарных частиц.

Заключение.

В рамках данного реферата были рассмотрены следующие фундаментальные философские проблемы физики элементарных частиц:

1. Проблема элементарности частиц: делимость материи, критерий элементарности частицы, вопрос движения частиц.
2. Современное представление о материи в рамках теории лептонов и кварков и 4-х фундаментальных взаимодействий. Проблемы и вопросы, встающие перед физикой при описании этого представления.
3. Фундаментальность симметрии в физике элементарных частиц. 3 функции принципов симметрии в физическом познании: организующая, ограничительная и объединяющая.
4. Применение принципов симметрии в физике элементарных частиц. В частности, рассмотрены такие применения принципов симметрии в физике, как изучение следствий релятивистской инвариантности уравнений и использование внутренних симметрий, изотопической и калибровочной.

Литература.

1. Б.Г. Кузнецов "Что такое элементарные частицы" из сборника "Проблемы теории элементарных частиц", (1964г.)
2. В.Д. Баргер, Д.Б. Клайн "Столкновения элементарных частиц при высокой энергии", из сборника "Проблемы физики элементарных частиц", (1968г.)
3. Л.Б. Окунь " $\alpha\beta\gamma$... Z. Элементарное введение в физику элементарных частиц" Библиотечка Квант, выпуск 45 (1985 г.)
4. П. Мэтьюс "Релятивистская квантовая теория взаимодействий элементарных частиц" (1959 г.)
5. С.В. Илларионов, Е.А. Мамчур "Принципы симметрии в физике элементарных частиц" из сборника "Философские проблемы физики элементарных частиц (30 лет спустя)" (1994 г.)