электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 02, февраль 2016

УДК 53.01:54-123

Собственное квантовое число спин в химии

***Безбородов А.В.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Технологии сварки и диагностики»

Научный руководитель: Фадеев Г.Н., д.пед.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Химия»
bauman@bmstu.ru

Несмотря на то, что за последние десятилетия наука шагнула далеко вперёд, в современной физической химии существуют разные типы трудных вопросов. Обычно внимание публики приковано к поиску новых частиц или экзотических явлений, но для самих химиков и физиков не менее интересными и трудными являются вопросы о *сложном устройстве* некоторых обычных частиц, например, протонов. Главная проблема тут заключается не в том, из чего протоны состоят, а в том, как наблюдаемые характеристики протонов возникают из свойств составляющих его частиц.

Долгое время далеко не все свойства частиц были известны учёным. Энергетическое состояние электрона, к примеру, описывается функцией трех целочисленных параметров *n, l, ml*, которые называются *квантовыми числами.* При определённых значениях квантовых чисел можно получить характеристики области, где может находится электрон. Эти значения являются следствием решения волнового уравнения Шрёдингера и позволяют определить энергию электрона через описание его волновых свойств. При этом не учитывался двойственный характер природы элементарных частиц, их корпускулярно – волновой дуализм в описании энергетического состояния электрона. Как следствие корпускулярных свойств электрона, в описании его энергетического состояния играет роль ещё одно число – *собственное квантовое число ms электрона – спин.*

Спин (от англ. *spin* – вращаться) – собственный момент количества движения элементарной частицы, имеющий квантовую природу и не связанный с её перемещением в пространстве как целого. Спин отвечает неотъемлемому и неизменному внутреннему

вращательному состоянию, присущему частице, хотя это вращательное состояние нельзя трактовать классически – как вращение тела вокруг собственной оси. Наряду со спином, любая частица, перемещаясь как целое в пространстве (например, по замкнутой орбите) относительно некой внешней точки (центра орбиты), имеет относительно этой точки внешний или орбитальный момент количества движения.

В октябре 1925 года Гаудсмит совместно с Джорджем Уленбеком ввел в физику концепцию спина: на основе анализа спектроскопических данных они предложили рассматривать электрон как «вращающийся волчок», обладающий собственным механическим моментом, равным $\hbar/2$, и собственным магнитным моментом, равным магнетону Бора. Схожие идеи приходили в голову многим физикам, однако не были сформулированы с достаточной отчетливостью. Так, ещё в 1921 году Артур Комптон, пытаясь объяснить магнитные свойства вещества, высказал мысль об электроне, вращающемся «подобно миниатюрному гироскопу». Позже Вольфганг Паули в знаменитой работе, посвященной принципу запрета, был вынужден приписать электрону «двузначность, не описываемую классически». В начале 1925 года Ральф Кронig предположил, что эту двузначность можно объяснить вращением электрона вокруг оси, однако вскоре он столкнулся с серьёзными трудностями (согласно расчетам, скорость на поверхности электрона должна превышать скорость света). Кроме того, эта гипотеза встретила негативную реакцию со стороны Паули, Хендрика Крамерса и Вернера Гейзенберга, и Кронig решил не публиковать её .

По-видимому, эта двузначность (четвертая степень свободы, или квантовое число, электрона) была также исходным пунктом работы Уленбека и Гаудсмита, и они также решили связать её с вращением электрона вокруг своей оси. Они изучили старые работы Макса Абрагама, посвященные вращению заряженной сферы, но вскоре столкнулись с теми же трудностями, что и Кронig. Тем не менее, они сообщили о своей гипотезе Эренфесту, которому она понравилась. Он предложил своим ученикам написать небольшую заметку для журнала *Die Naturwissenschaften* и показать её Хендрику Лоренцу. Лоренц произвел ряд вычислений электромагнитных свойств вращающегося электрона и продемонстрировал нелепость выводов, к которым приводит эта гипотеза. Уленбек и Гаудсмит посчитали за лучшее не публиковать свою статью, однако было поздно: Эренфест уже отослал её в печать. По этому поводу он заметил: «Вы оба достаточно молоды, чтобы позволить себе сделать одну глупость!».

Появление статьи Уленбека и Гаудсмита породило бурное обсуждение гипотезы спина в научных кругах. Помимо отмеченных затруднений, к которым приводило

представление о вращении электрона, оставалась нерешенной проблема лишнего множителя 2, появлявшегося в выражении для сверхтонкой структуры водородного спектра. Поэтому поначалу отношение к спину было весьма скептическим. Решающей оказалась позиция Нильса Бора, который с воодушевлением воспринял появление этой гипотезы, открывавшей новые возможности для описания атома. Бор предложил Уленбеку и Гаудсмиту ещё раз изложить свои доводы в статье для журнала *Nature* и сопроводил её своими замечаниями. Окончательно правильность идеи о спине стала ясна весной 1926 года, когда расчеты спин-орбитального взаимодействия, проведенные Ллевеллином Томасом и Яковом Френкелем с учетом релятивистских эффектов (так называемая томасовская прецессия), позволили объяснить тонкую структуру спектров (в том числе избавиться от лишнего множителя) и аномальный эффект Зеемана.

Идея спина буквально витала в воздухе: помимо уже упомянутых учёных, схожие мысли высказывали Гарольд Юри (для электрона), Шатьендранат Бозе (для фотона) и тот же Паули (для атомного ядра). По этой причине однозначно определить приоритет в вопросе открытия спина не представляется возможным. Видимо, это и стало основной причиной того, что открытие спина так и не было удостоено Нобелевской премии.

В 1921 году опыт Штерна — Герлаха подтвердил наличие у атомов спина и факт пространственного квантования направления их магнитных моментов.

Опыт Штерна - Герлаха — опыт немецких физиков Отто Штерна и Вальтера Герлаха, осуществлённый в 1922 году подтвердил наличие у атомов спина (изначально в эксперименте участвовали атомы серебра, а потом и других металлов) и факт пространственного квантования направления их магнитных моментов.

Опыт состоял в следующем: пучок атомов серебра пропускали через сильно неоднородное магнитное поле, создаваемое мощным постоянным магнитом. При прохождении атомов через это поле, в силу обладания ими магнитных моментов, на них действовала зависящая от проекции спина на направление магнитного поля сила, отклонявшая летящие между магнитами атомы от их первоначального направления движения. Причём, если предположить, что магнитные моменты атомов ориентированы хаотично (непрерывно), то тогда на расположенной далее по направлению движения атомов пластинке должна была проявиться размытая полоса. Однако вместо этого на пластинке образовались две достаточно чёткие узкие полосы, что свидетельствовало в пользу того, что магнитные моменты атомов вдоль выделенного направления принимали

лишь два определённых значения, что подтверждало предположение квантово-механической теории о квантовании магнитного момента атомов.

Позднее с аналогичными результатами были проделаны опыты для пучков атомов других металлов, а также пучков протонов и электронов. Эти опыты доказали существование магнитного момента у рассмотренных частиц и показали их квантовую природу, явив собой доказательство постулатов квантовой теории.

Как следствие корпускулярных свойств электрона, спин рассматривается *как собственное квантовое число ms электрона*. Это квантовое число характеризует не орбиталь, а свойство самого электрона, находящегося на этой орбитали.

Вектор спина является единственной величиной, характеризующей ориентацию частицы в квантовой механике.

Любая частица может обладать двумя видами углового момента: орбитальным угловым моментом и спином.

В отличие от орбитального углового момента, который порождается движением частицы в пространстве, спин не связан с движением в пространстве. Спин — это внутренняя, исключительно квантовая характеристика, которую нельзя объяснить в рамках релятивистской механики. Если представлять частицу (например, электрон) как вращающийся шарик, а спин как момент, связанный с этим вращением, то оказывается, что поперечная скорость движения оболочки частицы должна быть выше скорости света, что недопустимо с позиции релятивизма.

Будучи одним из проявлений углового момента, спин в квантовой механике описывается векторным оператором спина, алгебра компонент которого полностью совпадает с алгеброй операторов орбитального углового момента. Однако, в отличие от орбитального углового момента, оператор спина не выражается через классические переменные, иными словами, это только квантовая величина. Следствием этого является тот факт, что спин (и его проекции на какую-либо ось) может принимать не только целые, но и полуцелые значения (в единицах постоянной Дирака $\hbar$).

Спин измеряется в единицах $\hbar$ (приведённой постоянной Планка, или постоянной Дирака) и равен $\hbar J$, где J — характерное для каждого сорта частиц целое (в том числе нулевое) или полуцелое положительное число — так называемое ***спиновое квантовое число***, которое обычно называют просто спином (одно из квантовых чисел). В связи с этим говорят о целом или полуцелом спине частицы.

Постоя́нная Дира́ка ($\hbar$) - иногда используемое название для редуцированной постоянной Планка

$$\hbar \equiv h/2$$

— коэффициента, связывающего угловую частоту $\omega = 2\pi\nu$ (ν— частота) фотона (или другого кванта) с его энергией: $E = \hbar\omega$, где h — (нередуцированная) постоянная Планка. Иногда постоянную Дирака называют также рационализированной или приведённой постоянной Планка.

$$\hbar \equiv \mathrm{h}/2\pi = 1{,}054\ 571\ 628(53) \times 10^{-34}\ \text{Дж·с} =$$

$$= 6{,}582\ 118\ 99(1) \times 10^{-16}\ \text{эВ·с}.$$

Вследствие того, что все элементарные частицы одного и того же сорта тождественны, волновая функция системы из нескольких одинаковых частиц должна быть либо симметричной (то есть не изменяется), либо антисимметричной (домножается на −1) относительно перестановки местами двух любых частиц. В первом случае говорят, что частицы подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна и называются бозонами. Во втором случае частицы описываются статистикой Ферми — Дирака и называются фермионами.

Оказывается, именно значение спина частицы говорит о том, каковы будут эти симметрийные свойства. Сформулированная Вольфгангом Паули в 1940 году теорема о связи спина со статистикой утверждает, что частицы с целым спином (*s* = 0, 1, 2, …) являются *бозонами* (например, фотон, глюон, мезоны, бозон Хиггса), а частицы с полуцелым спином (*s = 1/2, 3/2,* …) — *фермионами* электрон, протон, нейтрон, нейтрино.

Самый простой пример спина - это целый *спин равный 1:*

- если взять вектор (для примера - положить ручку на стол) и повернуть его на 360 градусов , то этот вектор вернется в свое первоначальное состояние (ручка опять будет лежать так же как и до поворота).

Также легко представить себе *спин равный 0*:

- это точка - она со всех сторон выглядит одинаково как ее ни крути.

Чуть сложнее - целый *спин равный 2:*

- нужно будет придумать объект который ведет себя так же как в предыдущем примере со спином 1 но при повороте на 180 градусов (то есть вдвое меньше полного оборота) - это тоже просто - нужно взять двунаправленный вектор (примером из жизни может служить обычный карандаш только заточенный с двух сторон или не заточенный вообще - главное чтобы был без надписей и однотонный, Хокинг в качестве примера приводил обычную

игральную карту типа короля или дамы) - и тогда после поворота на 180 градусов он вернется в положение не отличимое от исходного.

А вот с полуцелым спином равным $^1/_2$ уже придется включать воображение:
- здесь нужно будет взять лист Мебиуса и представить что по нему ползет муравей, тогда сделав один оборот (пройдя 360 градусов) муравей окажется в той же точке - но с другой стороны листа, а чтобы вернуться в точку откуда он начал - придется пройти все 720 градусов.

Ниже приведена статья, в которой рассматривается, из чего складывается спин протона, насколько это верно, относительно, и имеет ли место быть данная теория с точки зрения современной науки.

«Разговор о строении протона включает в себя много отдельных вопросов, каждый из которых сам по себе сложен. Этот рассказ посвящен одному из них — вопросу о том, *как возникает спин протона*. На первый взгляд, ситуация здесь похожа на большинство других вопросов в физике элементарных частиц: есть много экспериментальных данных, есть много теоретических работ, есть какие-то спорные моменты или необъясненные пока данные. В общем, этакая рутина в физике частиц. Но не так всё просто.

Лет пять назад теоретики вдруг резко активизировались. Пошла лавина публикаций по этому вопросу, и, в буквальном смысле слова, стали накаляться страсти. Появлялись новые статьи, комментарии к статьям, возражения к комментариям, опровержения возражений к комментариям и так далее. И вот что интересно: причиной такого всплеска стали вовсе не новые экспериментальные данные (это было бы понятно), а именно теоретические статьи! Вдруг оказалось, что некий нерешенный вопрос, над которым физики давно работали, но саму формулировку которого все они вроде бы хорошо понимали, — вот этот вопрос переворачивается с ног на голову. По сути, физики стали бурно спорить уже не столько о решении, сколько о *смысле этого вопроса.* И со стороны могло показаться, что с каждой новой статьей, с каждым новым аргументом ситуация эта только запутывается.

Конечно, это сложная тема. Однако вопрос кажется очень интересным и злободневным, да и сама ситуация, которая сейчас сложилась вокруг него, несколько необычна. Поэтому мы рискнем рассказать о некоторых важных, но не слишком сложных аспектах этой проблемы. Даже если детали окажутся непонятными, этот рассказ можно просто воспринимать как иллюстрацию того, какого типа вопросы иногда обсуждаются в современной физике элементарных частиц.

Загадка протонного спина — стандартная версия.

Что значит слово «состоит»?

Жизненный опыт говорит нам, что если сложный материальный объект состоит из более простых, то вот это понятие — «состоит» — является абсолютным, не зависящим от точек зрения или условий наблюдения. То же самое работает и в физике вплоть до отдельных атомов. Например, молекула кислорода O_2 состоит из двух атомов — и никакого плюрализма мнений относительно этого факта быть не может. Та же самая абсолютность касается и физических характеристик системы, но с одним маленьким изменением. Скажем, полная энергия этой молекулы складывается из энергий покоя каждого атома и энергии их взаимодействия. И хотя эту энергию взаимодействия нельзя разбить на две части и отнести каждую половинку к отдельному атому, всё равно можно сказать, что энергия взаимодействия — это «отдельная строчка» в энергетическом балансе молекулы, и ее невозможно спутать с энергией покоя атомов.

Немножко шокирующей новостью после всего этого может стать утверждение, что в физике элементарных частиц *понятие «состоит» становится относительным*. Состав сложной частицы, оказывается, кардинально зависит от того, из какой системы отсчета мы смотрим на частицу. Самый подходящий для нас пример — протон. Если мы смотрим на протон из его системы покоя, то можно сказать, что он состоит из трех кварков, которые скреплены сильным взаимодействием. Многие физические характеристики протона и других адронов получаются путем простого комбинирования характеристик кварков, иногда с добавлением скрепляющего их силового поля.

Но если на тот же протон взглянуть из системы отсчета, где он движется со скоростью, очень близкой к скорости света, то он уже будет казаться состоящим вовсе не из трех кварков, а из большого числа кварков, антикварков и глюонов, летящих рядом (рис. 1). Сколько их — сказать *нельзя*, как минимум потому что это число не фиксировано, а зависит от системы отсчета наблюдателя. Заметьте, мы с самим протоном ничего не делаем, он остается тем же самым объектом, что и раньше. Мы просто *смотрим на него по-другому*, из другой системы отсчета.

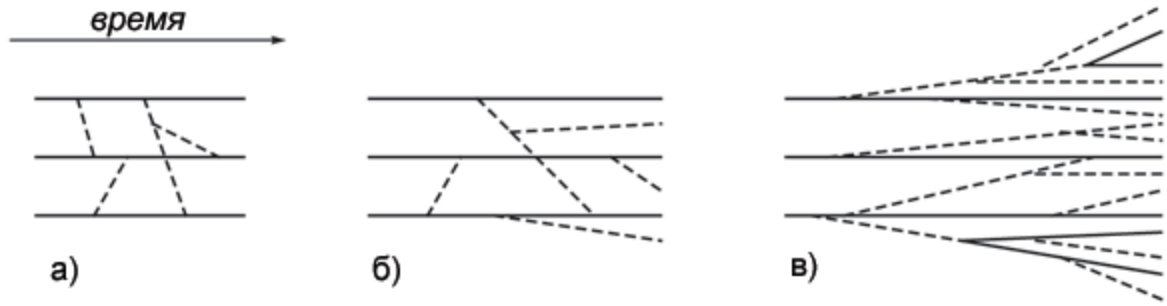

Рис. 1. Схематичное изображение протона в разных системах отсчета. Медленно движущийся протон (а) можно представлять в виде трех кварков (*сплошные линии*), которые связаны друг с другом глюонами (*штриховые линии*). В быстро движущемся протоне (б) глюоны уже иногда летят рядом с кварками. При скорости протона, очень близкой к скорости света (в), и глюоны, и порожденные ими кварк-антикварковые пары становятся полноправными составляющими частями протона.

Как такое вообще может быть? Оказывается, это прямое следствие квантовой теории поля — той (единственно работающей пока!) картины квантовых процессов при околосветовых скоростях, которую дает нам современная физика. Силовые поля в ней обеспечиваются обменом частицами — квантами силовых полей. Скажем, электромагнитное взаимодействие получается из-за обмена фотонами, сильное взаимодействие между кварками — из-за обмена глюонами. В системе покоя эти фотоны или глюоны *виртуальные*, они не могут свободно летать, они не похожи на реальные частицы. Однако в системе отсчета, в которой весь протон пролетает мимо нас с околосветовой скоростью, эти глюоны по своим характеристикам почти не отличаются от частиц материи. И те, и другие являются «комочками полей» разного типа, несущими энергию, импульс и другие характеристики. И те, и другие считаются полноправными составными частями протона.

Из чего складывается спин протона?

Теперь перейдем непосредственно к спину протона. Протон относится к фермионам, он имеет спин 1/2. Поскольку протон является составной частицей, его спин должен как-то возникать из характеристик составных частей. С неподвижным протоном всё просто: три кварка, тоже со спинами $S_q = 1/2$, но направленными в разные стороны, складываются так, чтобы их спины частично компенсировались и в сумме получилось снова 1/2 (см. рис. 1, слева). В принципе, кварки могли бы двигаться внутри протона, как это делают многие электроны в атоме, и тогда появился бы новый источник для

протонного спина — орбитальный угловой момент L_q. Но, к счастью, для покоящегося протона всё просто: орбитальный угловой момент кварков равен нулю.

Очень хорошо. А как обстоит дело с быстро летящим протоном? Помня про то, что силовое глюонное поле теперь является полноправной частью протона, надо честно сказать, что спин протона должен складываться из всех возможных источников (рис.1). Теперь и кварки, и глюоны могут давать вклад в спин поляризованного протона, причем как за счет своего собственного, «личного» спина, (S_q и S_g), так и за счет возможного орбитального углового момента (L_q и L_g):

$$S_q + L_q + S_g + L_g = 1/2$$

И вот вокруг этого простого разложения уже 30 лет ведутся ожесточенные бои!

В чём тут, собственно, проблема? Сначала надо упомянуть одну важную тонкость. Выше уже было сказано, что кварков и глюонов в протоне очень много; все они несут разные доли полного импульса протона и ориентированы немножко по-разному. Поэтому величина S_q в написанном выше выражении — это вовсе не спин одного кварка, а *усредненное* значение этого спина по всем кваркам. Аналогично и для других величин: все они представляют собой не характеристики отдельных частиц, а их усредненные значения. Кроме того, написанная выше формула относится не к полным векторам спина или орбитального момента, а к их проекциям на ось движения протона.

Кажется вполне естественным, что средний спин кварков всё равно получится близким к 1/2, также как и для покоящегося протона. Всё-таки мы сам протон не трогаем, мы просто переходим из одной системы отсчета в другую. Поэтому первоначальное ожидание физиков было простое: в написанной выше формуле почти вся половинка происходит из величины S_q, а остальные слагаемые будут если и не нулевые, то довольно маленькие.

Экспериментальные данные.

А теперь — экспериментальные данные. Спин протона мы можем измерить напрямую, но как измерить спины или орбитальный момент кварков или глюонов по отдельности? Это очень непростая задача, ведь свойства кварков и глюонов можно почувствовать только косвенно, по характеристикам процесса столкновения протонов друг с другом или с электронами. В 1988 году коллаборация EMC в ЦЕРНе провела измерения некоторой спиновой характеристики мюон-протонного рассеяния и извлекла из них средний спин кварков в протоне. Он оказался *намного меньше 1/2*. Более того,

первоначальные данные EMC вообще допускали нулевой вклад, что кардинально противоречило первоначальным ожиданиям. Эти результаты были сразу объявлены революционными, и началась эпопея под названием «кризис протонного спина» (*proton spin crisis).*

Теоретики бросились вычислять в рамках различных моделей протона вклады других слагаемых. Экспериментаторы бросились перемерять результаты EMC на своих установках, а заодно пытались придумать способы измерить и другие вклады. В том же ЦЕРНе был построен и запущен эксперимент *COMPASS*, одной из главных целей которого было измерение вклада глюонного спина, S_g. Аналогичные научные задачи ставились и решались в других научных лабораториях по физике частиц. В общем, спиновая физика адронов резко активизировалась.

Пропуская все промежуточные результаты, сформулируем нынешнюю ситуацию с этими экспериментальными данными: (1) подтверждено, что вклад спина кварков S_q мал, и по новым данным он составляет примерно треть от спина протона; получается, что две трети протонного спина «где-то прячутся»; (2) обнаружено, что вклад спина глюонов S_g тоже невелик; погрешности там остаются большими, но уже ясно, что списать «потерянный протонный спин» на него не получится; (3) надежных измерений орбитального момента кварков или глюонов пока нет. Таким образом, в настоящий момент нельзя сказать, что найдено какое-то общепринятое решение спинового кризиса, и вряд ли его удастся найти без спиновых экспериментов нового поколения.

Загадка протонного спина — версия современной теории.

А теперь — немножко неожиданный поворот событий. Жаркие баталии физиков по этому поводу по-прежнему продолжаются, но сейчас их тон полностью переменился. Главный вопрос, вокруг которого эти битвы идут уже несколько лет, таков: А какой вообще смысл у написанной выше формулы?

Как-то неожиданно оказалось, что у этого простого вопроса есть несколько уровней разговора. Возникло множество предметов спора и множество непримиримых точек зрения. Изначально считалось, что это разложение спина протона существует и что оно единственно. Потом — что их два. Потом — что их много. Потом — что их *бесконечно* много. А поскольку они неэквивалентны, возник спор, какое разложение отвечает физической истине. А если оказывается, что истинными является не одно, а несколько, то какое из них более физично. Ну а в таком случае надо определить, что вообще должно считаться критерием истинности или физичности — и по *этому* поводу тоже разгорелись баталии.

Вот такой тугой клубок вопросов стал вдруг предметом сотен теоретических публикаций. В результате сейчас большинство физиков, работающих над этим вопросом, разошлись на несколько враждующих лагерей. Каждый лагерь выискивает недостатки в чужой точке зрения и старается привести новые доказательства в пользу своей. А растерявшиеся экспериментаторы неожиданно оказались вообще как бы в стороне.

О чём, собственно, спор?

Пытаться адекватно описать все тонкости разделения протонного спина на отдельные составляющие — задача, видимо, неподъемная для научно-популярной новости. Тем не менее можно дать хотя бы поверхностное представление о том, о чём идет полемика. Для этого попробуем упомянуть некоторые спорные моменты, причем далеко не самые сложные из них. Но прежде — одно маленькое, но существенное отступление.

Дисклеймер для ищущих «физическую правду».

Среди любителей физики — и особенно любителей, опровергающих современную физику, — распространена точка зрения, что физика-де оперирует какими-то заумными математическими понятиями, полностью оторвалась от реальности, и поэтому она бессмысленна и нефизична. Эта точка зрения наивна. Задача теоретической физики — строить теории, которые, во-первых, самосогласованны математически, во-вторых, позволяют вычислять реально наблюдаемые величины и не противоречат уже полученным надежным экспериментальным данным, и в-третьих, имеют предсказательную силу. При этом теориям разрешается на промежуточном этапе использовать «странные» математически объекты типа комплексных чисел, абстрактных пространств или сложных алгебраических понятий. Главное, чтобы результаты для *измеряемых* величин у *реальных* физических объектов были нормальными числами.

Теперь, наконец-то, поговорим про предмет спора.

Два разных импульса.

Тонкости начинаются уже при разговоре об обычном (линейном) импульсе, а не о вращательном моменте импульса. В школьной механике импульс тела определяется просто: масса умножить на скорость. Однако в «серьезной» физике есть два импульса — кинетический и канонический. Они совпадают в школьной механике, но отличаются в чуть более сложных ситуациях, например при движении зарядов во внешнем электромагнитном поле. И тот, и другой — это полноценные физические величины, но только они входят в разные формулы и подчиняются разным законам. С этим вопросов

нет; но спор может начаться, если пытаться понять, какой из них «более настоящий». В квантовой теории поля это неизбежно приводит к вопросу, что такое вообще импульс (а точнее, оператор импульса) и какие на него налагаются требования. Те же вопросы возникают и для момента импульса.

Авторы обзора показывают, что расхождение между «лагерями» состоит как раз в том, что некоторые используют кинетический момент импульса, а некоторые — канонический. Сами они предлагают свои четкие критерии физичности, и по ним выходит, что «более настоящим» является канонический. Авторы допускают, что некоторые экспериментальные результаты проще интерпретировать в терминах кинетического момента импульса, но тогда надо быть аккуратным в разложении спина протона.

Как разделять части взаимодействующей системы.

Другая важная тонкость возникает из-за того, что кварки и глюоны в протоне взаимодействуют. Наш разговор про неабсолютность понятия «состоит» наводит на мысль, что само по себе разделение протонного спина на долю кварков и долю глюонов не является абсолютно четким. И действительно, если сравнивать формулы этого разделения для разных авторов, то получается, например, что одни и те же слагаемые у одних относятся к L_q, а у других — к L_g (рис. 2).

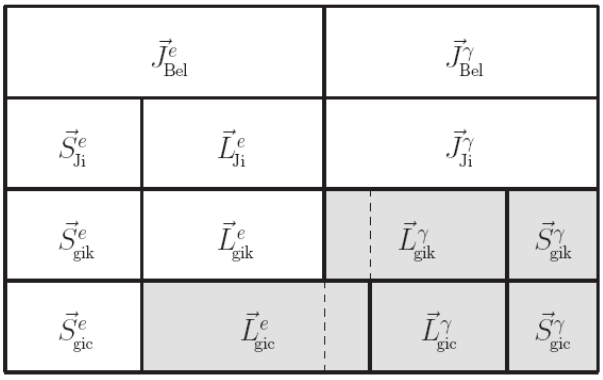

Рис. 2. Схематичное изображение того, как разные слагаемые в формуле для полного спина выглядят в подходах разных авторов. Для простоты здесь взят пример электродинамики (то есть электроны и фотоны), а не сильного взаимодействия (кварки и глюоны). Видно, что иногда полный момент импульса J разделяется на спин S и орбитальный угловой момент L, а иногда нет. Кроме того, есть слагаемые, которые в зависимости от точки зрения можно относить либо к электрону, либо к фотону.

Калибровочная (не)инвариантность

Еще один предмет спора касается калибровочной инвариантности операторов момента импульса (чуть подробнее про калибровочную симметрию см., например, в статьях «Большие калибры физики» и «Что такое цветовой заряд, или какие силы связывают кварки». В квантовой теории есть два «уровня» разговора — уровень операторов и уровень наблюдаемых величин. Сама теория строится с помощью сложных математических объектов — линейных операторов и пространства, в котором они действуют. Но к эксперименту имеют отношение не непосредственно они, а полученные из них «наблюдаемые» величины. Наблюдаемые величины должны быть физичными, и в частности, калибровочно инвариантными. Но нужно ли требовать того же от операторов? И если требовать, то нужно ли настаивать на инвариантности относительно *любых* калибровочных преобразований или только некоторых?

Авторы обзора резонно говорят, что нет, строгой калибровочной инвариантности от операторов требовать не нужно. Операторы (или пространства, в которых они действуют), будучи промежуточными математическими объектами теории, могут обладать некоторыми «ненормальными» свойствами; главное, чтобы вычисленные по ним наблюдаемые величины были нормальными. Зато физики из другого «лагеря» считают, что калибровочная инвариантность операторов — это важный критерий физичности формул; именно на основании этого критерия они отдают предпочтение своей формуле для разложения спина протона.

Разделение на спин и орбитальный угловой момент.

Еще один момент касается того, разделяется ли полный угловой момент (величина, обозначенная буквой J на рис. 2) на спин и орбитальный угловой момент, и если да, то в каком смысле. С одной стороны, множество учебников по квантовой теории поля утверждает: это разделение векторных операторов невозможно выполнить калибровочно-инвариантным способом. Но в 2008 году была опубликована статья, продемонстрировавшая, по сути, что это утверждение неверно. Ее авторы предложили такое разделение и показали, что оно калибровочно-инвариантно. Получается, что все учебники ошибались?

Вовсе нет, но для этого надо читать мелкий текст. Учебники говорят, что калибровочно-инвариантное разделение спина и орбитального момента невозможно, если требовать, чтобы операторы были *локальными*. А в предложении 2008 года, как поясняет обзор, это условие нарушено, поэтому никакого противоречия нет. Эта тонкость была

не сразу отслежена научным сообществом, поэтому сразу после статьи 2008 года последовали многочисленные публикации всех заинтересованных сторон, и страсти резко накалились. И именно после этой полемики стало понятно, что на самом деле разделение протонного спина можно провести бесконечным числом способов. В обсуждение этого вопроса мы вдаваться уже не будем; желающие могут самостоятельно полистать обзор.

Выводы.

Так из чего всё-таки складывается спин протона? Такой простой, казалось бы, вопрос чуть ли не на ровном месте заводит физиков в дебри, полные теоретических тонкостей. Фундаментальная причина проста*: в квантовой теории поля вопрос о разложении составной частицы на отдельные части не является четко определенным***.** И в применении к проблеме разделения спина протона на отдельные слагаемые это свойство приводит к длинному списку спорных моментов.

Насколько важно с научной точки зрения установить, какая из формул более правильна, чем другая? Один из главных выводов обзора заключается в том, что *эта неопределенность не так уж и важна*. Все формулы (за исключением ошибочных) работают и имеют право на существование. Но какая из них более физична, какая лучше всего отвечает интуитивным представлениям — это уже дело вкуса. Да, они могут приводить к разным ответам, но не надо считать, что это разные ответы для *одной и той же величины*. Это разные ответы для разных наблюдаемых величин, только, к сожалению, многие называют эти разные величины одинаковыми словами. Вот этого авторы обзора предлагают не делать.

А как тогда быть экспериментаторам? Ведь они пытаются измерить состав спина или орбитального момента кварков или глюонов на опыте. С какой формулой им сравниваться? Ответ в том, что на пути между реальным измерением и сравнением с формулами лежит *интерпретация измерений*, и вот для этой задачи интерпретация, к сожалению, очень неоднозначна. Это было известно и раньше, но именно в процессе спора открылись новые грани этой неоднозначности. Поэтому сравниваться им можно с чем угодно, но надо только четко указывать, что именно они измерили и в рамках какого именно разложения они делают выводы. Может быть, это несколько усложнит описание результатов эксперимента, но, по крайней мере, такой подход будет честным».

В заключение хочется добавить, что данную статью нельзя рассматривать как исследовательскую, поскольку в ходе её написания не проводились эксперименты. Это связанно с отсутствием возможности исследований квантовой природы понятия спин. В

этой работе использованы ранее известные научные данные и факты, которые не были последовательно систематизированы и изложены в одном источнике, что, собственно, я постарался и сделать.

Список литературы

[1]. Голубев А.М., Лебедев Ю.А., Фадеев Г.Н., Шаповал В.Н. Химия: учебник для бакалавров / под общ. ред. Г.Н. Фадеева. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. 527с.

[2]. Горбунов А.И., Гуров А.А., Филиппов Г.Г., Шаповал В.Н. Теоретические основы общей химии: учебник для студентов технических университетов и вузов / под ред. А.И. Горбунова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 720 с.

[3]. Горбунов А.И., Филиппов Г.Г., Федин В.И. Химия. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 688с.

[4]. Свободная интернет – энциклопедия Википедия. Спин. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/ (дата обращения 12.05.15).

[5]. Фейнмановские Лекции по Физике, 8-9 том, квантовая механика. Режим доступа: http://www.all-fizika.com/article/index.php?id_article=35 (дата обращения 12.05.15).

[6]. Иванов И. Так из чего всё-таки складывается спин протона? Режим доступа: http://elementy.ru/news/432089 (дата обращения 12.05.15).