



Блог Игоря Иванова

<http://igorivanov.blogspot.ru/2011/04/oam.html>

24 апреля 2011 г.

Орбитальный угловой момент фотона (наглядные объяснения и дискуссии). Часть 1.

После [недавнего поста](#) Сергея Попова и моего (и [не только](#)) спора с ним про фотоны, приобретающие орбитальный угловой момент [в окрестностях вращающихся черных дыр](#), я решил кое-что поподробнее написать про закрученный свет вообще.

Добавление: раз тут такой интерес возник, то почитайте и [второй мой пост](#) про орбитальный угловой момент фотона, в котором среди прочего подробно объясняется отличие ОУМ от поляризации.

Вращающиеся волны

В классической механике есть два типа движения твердого тела — поступательное движение (т.е. перемещение центра масс) и вращательное. Величину поступательного движения задают с помощью вектора скорости, величину вращательного — с помощью вектора угловой скорости (направление этого вектора указывает ось, относительно которой вращается тело). То же самое, но немножко в других величинах — **импульс** и **момент импульса**; эти величины удобны тем, что для изолированной системы они не меняются во времени (а угловая скорость, например, может меняться).

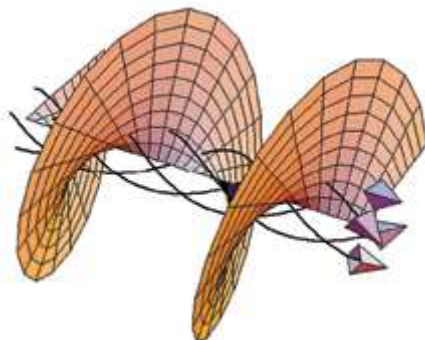
Обе эти величины — импульс и момент импульса относительно какой-то оси — существуют и для волн. Правда, волна — штука размазанная в пространстве, не точечная, поэтому для нее надо сначала определить плотность импульса и плотность момента импульса, а потом уж говорить про всю волну.

Волна, несущая импульс — это вещь стандартная. А как представить себе волну, несущую момент импульса? Особенно, если речь идет про линейную волну, т.е. волну, которая сама себя не чувствует, сама себя не искажает. Ведь момент импульса — это вращение, а вращение — это движение по кривой траектории, а линейная волна вроде как движется по прямой, она не может сама себя закрутить — по крайней мере так подсказывает интуиция.

На самом деле, тут интуиция дает сбой — как раз потому что волна не точечная штука, а мы привыкли иметь дело с более-менее локализованными объектами. Волны можно *накладывать*

друг на друга, и это наложение будет иметь разные последствия в разных местах пространства. В результате этого в каждой точке пространства волна — локально! — будет бежать в какую-то свою сторону, иногда даже вбок от общего движения волны. Иными словами, энергия волны не просто бежит вперед, но и по пути перераспределяется в пространстве. Это нормально, это одно из следствий интерференции волн.

Так вот, наложение волн можно организовать так, чтоб эти локальные направления движения, этот поток энергии волны закручивался относительно выделенной оси. Вот картинка, которая это примерно иллюстрирует:



Поверхность постоянной фазы в «закрученной» волне. Рис. из [статьи Science, 296 \(2002\) 2316](#).

Поверхность в виде штопора на этом рисунке — это поверхность постоянной фазы, т.е. те точки пространства, в которых волна находится в одинаковой фазе колебания. Стрелочки, перпендикулярные этой поверхности и идущие по винтовым линиям, показывают локальное направление движения волны. Для обычной плоской волны поверхности постоянной фазы — это просто плоскости, а перпендикулярные стрелочки везде были бы строго параллельны друг другу. А тут поверхность закручивается, и эти стрелочки как бы «обертыывают» ось движения.

Именно это обертывающее движение и придает волне «в целом» некоторое вращение: волна летит вперед и вращается вокруг оси движения. Но получается это не из-за того, что волна крутится как твердое тело, а из-за коллективного эффекта наложения волн. Тем не менее это самое настоящее вращение в пространстве. Такая волна несет момент импульса, и если какое-то тело ее поглотит, то момент импульса передастся ему, и оно начнет вращаться.

Немного формул

На рисунок можно взглянуть и чуть иначе. Представьте себе, что вы рассекаете эту волну плоскостью, перпендикулярной оси z (оси движения волны «в целом»). Тогда разные точки на этой плоскости будут отвечать разным фазам волны. Если на этой плоскости вы обходите вокруг центральной точки по кругу, фаза волны будет постоянно расти, и на полном обороте набег фаз составит 2π . В комплексных обозначениях волновая функция обладает угловой зависимостью $\exp(i\phi)$, где ϕ — угол на этой плоскости. Закрутить волну можно и сильнее, организовав на полном обороте набег фаз кратный 2π . Зависимость от угла будет $\exp(im\phi)$ с каким-то целым числом m .

В классической механике момент импульса точечной частицы определяется через ее положение и импульс:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$

В волновой механике можно тоже использовать эту формулу (только для плотности момента импульса), но только надо уточнить, чему равен импульс волны (это ключевой шаг!). Это можно сделать, например, на квантово-механическом языке: $\vec{p} = -i\hbar \vec{\nabla}$. Тогда оказывается, что оператор момента импульса в этой ситуации будет выражаться через угловую зависимость:

$$L_z = -i\hbar \partial_\phi.$$

То есть, волна с множителем $\exp(im\phi)$ несет m квантов момента импульса.

Спин и орбитальный угловой момент

В квантовой механике момент импульса имеет две разных составляющих: орбитальный угловой момент и спин. Всё, о чем говорилось выше — это именно орбитальный угловой момент, т.е. механическая закрученность волнообразного объекта вокруг оси. Спин — это другая характеристика, которая не связана с механическим движением объекта.

При описании света и в калибровочных теориях вообще осмысленное разделение полного момента импульса волны на орбитальный угловой момент и спин — это отдельная длинная песня, я пока этого касаться не буду. Я просто хочу подчеркнуть, что ОУМ — это совсем не спин, он существует и у бесспиновых частиц (выше как раз такой случай и рассматривался).

Экспериментальные достижения

Я наверно напишу потом более технический пост про частицы с ОУМ, но пока что кратко опишу экспериментальную ситуацию.

Может показаться, что такие закрученные волны организовать очень трудно. На самом деле лазерные лучи, несущие орбитальный угловой момент, были реализованы еще в 1992 году. Такой закрученный свет можно получить, выделяя и складывая возбужденные поперечные моды из лазерного луча, а можно и просто пропустить обычный луч через фазовую пластинку или специальную голограмму. Сейчас такой «закрученный свет» уже рутинно используется в атомной физике, в физике поверхности, им также очень интересуются люди из квантовой теории информации.

Без труда можно получить и закрученные радиоволны. Я [как-то писал](#) про станцию HAARP на Аляске, которая облучает ионосферу и смотрит, что там происходит. Так вот, в том же посте есть картинки свечения ионосферы, облученной радиоволнами с ненулевым орбитальным угловым моментом.

Получать закрученные фотоны с энергией выше оптического диапазона трудно. Сейчас есть предложения, как это можно сделать в рентгене и даже в области высоких энергий (в ГэВ-ной области), но пока что это не реализовано. Зато уже получены **электронные волны**, несущие орбитальный угловой момент. Буквально несколько месяцев назад [были получены](#) электроны с энергией 300 кэВ и орбитальными числами $m \sim 100$.

Тот или не тот орбитальный угловой момент?

А теперь я вернусь к [спору](#), который состоялся у Сергея Попова в ЖЖ. Комментируя [недавнюю работу](#) про то, как фотоны приобретают орбитальный угловой момент при пролете вблизи вращающихся черных дыр, он отдельно выделял, что это «не совсем тот» угловой момент, что есть у крутящихся предметов; похожий, но не тот.

Я хочу подчеркнуть еще раз — и надеюсь, благодаря предыдущему тексту это станет яснее — что это не какой-то новый особый вид углового момента, а именно **тот самый, обычный, родной вращательный момент импульса**, связанный с движением в пространстве. Единственная необычность в его описании связана с тем, что мы его пишем **для волны, а не для частицы**. Разница тут не в самом угловом моменте, а в том, про какой объект мы говорим — про волну или про частицу.

И кирпич, вращающийся вокруг своей оси, и электрон, сидящий в атоме, скажем, в Р-волне, и вот эти закрученные состояния света — все они обладают обычным орбитальным угловым моментом.

Этот орбитальный угловой момент описывается **одной и той же формулой** $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$. Только в случае кирпича эта формула трактуется на классическом языке, а в случае электрона в атоме или

световой волны — на квантовом. В обоих случаях имеется поток энергии, обертывающий ось движения, только описывается он иначе — механически или волнообразно.

73 комментария:

1.

Анонимный [25/4/11 13:32](#)

Замечательно. А нельзя ли столь же ясно пояснить, какой массой обладает бозон Хиггса, если он её - эту самую массу создаёт? Это в духе кто бреет брадобрея... Если это та же самая масса, что у других частиц, то должен быть другой бозон Хиггса, создающий массу для этого бозона. (Другой брадобрей)



2.

[Igor Ivanov](#) 25/4/11 13:37

Массу частиц создает не масса Хиггса, а поле Хиггса. Почитайте проект про LHC на «Элементах», там я про хиггсовский механизм простыми словами писал.

3.

Анонимный [25/4/11 18:32](#)

Не могу понять какой орбитальный момент имеется ввиду в середине статьи. Речь идет об орбитальном моменте волны относительно некоторой фиксированной точки в пространстве? И как вообще он связан с орбитальным моментом фотона? Откуда у фотона может быть еще и орбитальный момент, ведь он не по орбите движется...



4.

[Igor Ivanov](#) 25/4/11 19:17

Орбитальный момент не относительно точки, а относительно оси.

Давайте поясню на бесспиновом случае.

Вы фиксируете некую ось в пространстве, ось z , и ищите решения свободного волнового уравнения в цилиндрических координатах. Такие решения представляют собой волны с фиксированной частотой, фиксированным импульсом вдоль z , и с азимутальной зависимостью, которую я написал. Такие волны обладают определенной проекцией момента импульса L_z .

Насчет фотона — нет никаких проблем с тем, что у фотона есть ОУМ. Только в данном случае фотон — не плоская волна. В атомной физике, когда пишут переходы между разными электронными уровнями в атоме, тоже классифицируют излученные фотоны в соответствии с тем, какой орбитальный угловой момент они уносят.

Насчет того, что «ведь он не по орбите движется» — собственно я и постарался объяснить в посте, как представлять такие фотоны.

5.

Анонимный[25/4/11 20:51](#)

Ааааааааа... я понял! Спасибо, теперь понятно!

6.

Pavel[25/4/11 21:33](#)

Как может быть направлена ось, относительно которой считается орбитальный угловой момент фотона? Только в направлении полёта фотона, или ещё как-то? Наличие ненулевого момента импульса относительно произвольно взятой оси очевидно, неочевидно лишь вокруг оси, совпадающей с направлением полёта фотона, о чем как я понял, и шла речь.

И второй вопрос. Это всё никак не связано с понятием поляризации по кругу?



7.

Igor Ivanov[25/4/11 21:40](#)

Тут логика такая: сначала выбираем ось, потом строим состояние с ОУМ относительно этой оси. Это состояние уже не будет состоянием с определенным ОУМ относительно какой-то другой оси, но оно в принципе может быть переразложено по собственным состояниям с определенным ОУМ относительно другой оси. Правда, как это явно записать, я пока не знаю.

Напрямую никак. Поляризация — это спиновая степень свободы, а тут — орбитальная степень свободы.



8.

antihydrogen[26/4/11 15:05](#)

"как это явно записать, я пока не знаю"

Хм, а в чем сложность? Вроде бы, выделить парциальные волны с определенной проекцией момента на новую ось не слишком сложно: разложить исходное состояние по сферическим гармоникам, а потом повернуть систему координат, вылезут функции Вигнера и суммирование по новому m .



9.

Igor Ivanov[26/4/11 18:03](#)

Вот если сферические использовать, тогда хорошо. Но лазерные моды обычно описываются гаусс-лагеррами, и вот там тяжело. Тяжело даже в простом случае бесселевых пучков, которые я неявно подразумевал во втором комментарии. Бесселя переразлагать по неправильным осям трудно (и я пока это не умею делать).

10. 

[antihydrogen26/4/11 18:56](#)

Я подразумевал, что волну с цилиндрическим бesselем можно разложить по сферическим, а потом повернуть. Правда, не очень понятно, как после поворота все свернуть обратно в цилиндрические бesselи, раз именно они вам так нужны ...

11.

Анонимный [5/5/11 19:38](#)

Цитата:

Звучит странновато. На одном "обороте" фаза не может набежать не равной 2π . Иначе, что же такое "оборот"?

12. 

[Igor Ivanov5/5/11 19:41](#)

Фаза колебания и азимутальный угол — это разные величины. Функция $\exp(i m \phi)$ дает набег фазы равный $2\pi m$ при обходе вокруг центральной точки.

13.

Анонимный [5/5/11 20:25](#)

Разговор идет не о функциях, а о поле, которое вращается. Фаза колебания поля измеряется в какой-либо точке пространства. Набег фазы измеряется за какой-то период. Так за какой период у Вас набегает $2\pi m$ фазы в выбранной точке?

14. 

[Igor Ivanov5/5/11 21:34](#)

> Набег фазы измеряется за какой-то период.

Вы прочитайте внимательнее пост. Набег фазы, про который я говорю — это набег фазы при движении вдоль замкнутого контура в пространстве в какой-то фиксированный момент времени. А вовсе не при эволюции во времени в какой-то фиксированной точке.

15.

Анонимный [29/5/11 09:39](#)

Вот , померили электрон, оказался сферой

<http://www.nature.com/nature/journal/v473/n7348/full/nature10104.html>

по русски тут <http://lenta.ru/news/2011/05/26/round/>

Как-то уже приучили, что частицы - не то же, что тела, вообразить себе электрон в виде

шара трудно, а тут такой результат.

Вопрос - как Вам кажется, какие выводы вообще должны следовать из такого измерения? Сфера очень уж безупречна, о чём это может говорить? В мире макротел такой безупречностью что-то обладает? Разве только законы природы. Вроде закона равенства сил действия и противодействия. Оно (равенство), видимо, бесконечно по точности, иначе как вообще измерять силу. Так и тут - удивительно качественная сфера. Напрашивается - что электрон не "нечто", не кусок материи, а природный закон (или его действие)? Но - если его измеряли... следовательно, учёные считают, что электрон как-раз "тело", "нечто" и по идее не должен быть настолько безупречным.



16.

[Igor Ivanov29/5/11 13:09](#)

В эксперименте искали электрический дипольный момент электрона, т.е. то, насколько «центр заряда» смещен относительно «центра масс». Не нашли. А слова про «форму электрона», сферу и т.д. — это просто обертка для привлечения внимания к измерению. А вы почему-то начали рассуждать именно про обертку.

17.

[Анонимный29/2/12 07:00](#)

А скорость фотона с ОУМ так же точно равна c ? И энергия его получается больше, чем у фотона той же частоты но без ОУМ?



1.

[Igor Ivanov29/2/12 13:38](#)

У этого фотона две скорости — фазовая и групповая. Фазовая больше c , групповая меньше c , а в произведении они дают c^2 . Ситуация ровно такая же, как и в волноводах.

Энергия та же, что у плосковолнового фотона с той же частотой.

18.

[Анонимный3/3/12 19:32](#)

Все равно не понятно. Если групповая скорость такого фотона в вакууме меньше c , так его что, догнать можно? ;-)



1.

[Igor Ivanov3/3/12 19:38](#)

Можно сказать и так. А лучше — можно перейти в такую систему отсчета, где **средняя** скорость этого фотона будет равна нулю. Т.е. в цилиндрических координатах он там постоянно сходится и одновременно расходится по радиальной координате, но вдоль z никуда не движется.

На самом деле это совершенно неувидительная вещь. Вот еще более простой, одномерный пример. Пусть в оптическом резонаторе есть стоячая монохроматическая волна. Она в среднем никуда не движется. Берем квант этой волны, 1 фотон. Он тоже никуда не движется, т.е. этот фотон одновременно летит и направо и налево. Подчеркну, не два фотона, один направо другой налево, а один фотон в обе стороны одновременно. Находясь в системе отсчета резонатора, мы, получается, догнали этот фотон.

2.

Анонимный [17/3/12 12:01](#)

Ох, чего-то, не нравится мне этот пример.

Нет, пока не перешли к рассуждениям про "один фотон", всё так, но вот сказать, что "один фотон в обе стороны одновременно", ПМСМ, не корректно.

Мы же можем взять и измерить его импульс, который будет нулевым только в серии повторяющихся опытов, в среднем...

А в каждом конкретном случае измерения импульса ОДНОГО фотона, получим вполне себе однозначное направление и величину.



Igor Ivanov [17/3/12 13:27](#)

Извините за поучение, но это основы квантовой механики (операторы величин, собственные состояния этого оператора, среднее значение по состоянию и т.д.). Пересказывать это долго, лучше просто прочитать в учебниках.

4.

Анонимный [17/3/12 15:57](#)

Да, конечно, это основы квантовой механики, и, так же, как квантовая механика вообще, при переходе к рассмотрению отдельно взятого взаимодействия, это описание, доведённое до "одного фотона, летящего сразу в 2 стороны", мягко говоря, не соответствует действительности.

Ни одно из измерений импульса одиночного фотона в резонаторе, никогда не даст в результате нулевой импульс, соответствующий "покоящемуся фотону". Хотя, групповой эффект (среднее по множеству измерений) будет соответствовать этому описанию.

К чему я всё это пишу и почему...

Да к тому, что "орбитальный момент СВЕТА" - это далеко не то же самое, что "орбитальный момент одного фотона".

Это ГРУППОВОЕ и ТОЛЬКО групповое явление. Так же, как нулевой импульс СВЕТА, запёртого в резонаторе, и образовавшего стоячую волну.

Если "опуститься" до измерения "орбитального момента" отдельно взятого фотона, относительно оси его импульса, измеренного в момент поглощения или отражения, то никакого орбитального момента мы не намеряем, но если мы начнём измерять орбитальный момент светового луча, относительно оси этого луча, то вот тут-то и получим реальный орбитальный момент импульса.

Это явление можно рассматривать как взаимодействие фотонов в луче света (при

определённых условиях). Только и всего.
Или я не прав?



5.

[Igor Ivanov17/3/12 19:13](#)

Вы неправы, но для того, чтобы это понять, вам надо изучить основы квантовой механики. Поэтому воздержитесь, пожалуйста, от дальнейших комментариев по этой теме.

6.

[Василий18/3/12 05:53](#)

ОК. Каждый заблуждается в меру своих способностей :)

Просто, мне показалось, что, говоря о возможности разложения на плоские волны, с несовпадающими направлениями, Вы косвенно подтвердили именно то, что я писал в комментариях. В том числе и то, что такой свет может не расходиться только на коротком промежутке.

Ну да ладно. Видимо, понял не правильно.

У меня тогда появился другой вопрос.

Очевидно, что полная энергия фотона, обладающего дополнительно орбитальным моментом, выше, чем энергия точно такого же, не обладающего таковым. Верно?

Если да, то этот эффект должен сказываться на, например, способности света вызывать эмиссию свободных электронов на катоде (фотоэффект), а значит утверждение о принадлежности орбитального момента каждому фотону в пучке света подлежит однозначной экспериментальной проверке. Есть ли у Вас сведения о такой проверке? Или, может быть, другими экспериментальными методами.

Кстати, в первоисточниках на эту тему, термин "орбитальный момент фотона" мне не попадался, применяется исключительно термин light - т.е. свет.



7.

[Igor Ivanov18/3/12 15:16](#)

1) Существуют бездифракционные пучки. Бесселев пучок (в том числе, несущий ОУМ) — простейший пример. Разумеется, это теоретическая абстракция, и в реальности точный бесселев пучок получить невозможно, т.к. он бесконечный (точно так же, как и плоскую волну).

2) Нет, энергия фотона с ОУМ ничем не лучше и не хуже обычных фотонов, у всех у них может быть любая энергия. Если вы хотите сравнивать их с плосковолновыми фотонами, то вы скажите, что зафиксировано. Вы можете, например, сравнивать фотоны с одинаковым средним импульсом. Тогда у любого неплосковолнового фотона энергия будет больше, и это никак не связано с ОУМ. В частности, вы можете взять бесселев пучок с нулевым или ненулевым ОУМ и с одинаковыми остальными параметрами, энергия у них будет одинакова.

3) Есть стандартная методика измерения оптического ОУМ путем дифракции на дифракционной решетке с «вилкой» (т.е. с дислокацией). Она убедительно доказывает, что спиральный волновой фронт несет каждый фотон.

4) А вы почитайте первоисточники дальше заголовка и аннотации.

8.

Анонимный [25/4/12 09:42](#)

Игорю Иванову

"Можно сказать и так. А лучше — можно перейти в такую систему отсчета, где средняя скорость этого фотона будет равна нулю. Т.е. в цилиндрических координатах он там постоянно сходится и одновременно расходится по радиальной координате, но вдоль z никуда не движется.

На самом деле это совершенно неувидительная вещь. Вот еще более простой, одномерный пример. Пусть в оптическом резонаторе есть стоячая монохроматическая волна"

Аргумент неудачный. В резонаторе фотон ограничен стенками, а мы говорим о свободном фотоне. Если Вы правы насчет "можно перейти в такую систему отсчета, где средняя скорость этого фотона будет равна нулю", то это новое явление в науке - "неподвижный свободный фотон". Вероятно, Вы сможете его описать математически "в цилиндрических координатах он там постоянно сходится и одновременно расходится по радиальной координате, но вдоль z никуда не движется"

С уважением, Ходукин Владимир



9.

Igor Ivanov [25/4/12 10:40](#)

Ясно, что аналогия неполная. Но в обоих случаях у нас есть интерференция между волнами, идущими в разных направлениях, главное, чтоб эти волны были когерентными.

Да не новое это явление в науке, а хорошо известное.

19.

Анонимный [4/3/12 07:40](#)

Для меня удивительно, что свободный фотон может вести себя как массивная частица. Кажется стало доходить, как другие частицы состоят из различных полей. Спасибо большое.



1.

Igor Ivanov [4/3/12 14:47](#)

> ...свободный фотон может вести себя как массивная частица.

В каком-то смысле так говорить можно, но не стоит, потому что это может вызвать у людей неправильные ассоциации и привести к неправильным выводам.

20.

Анонимный [4/3/12 08:52](#)

Скажите пожалуйста, вращение плоскости поляризации это то же самое или нечто совсем другое?

1.



Igor Ivanov [4/3/12 14:46](#)

Совершенно другое.

У меня есть [второй пост](#) про ОУМ света, там объяснено подробно, что это разные вещи. Кстати, ОУМ может быть и у скалярной волны, у которой вообще не бывает поляризации, скажем у звуковой волны в воздухе.

2.

Анонимный [5/3/12 13:45](#)

Большое спасибо, вы очень любезны.

И еще вопрос. Можно ли разделить свет с ОУМ на индивидуальные составляющие из которых он сложен? И если да, то куда денется момент вращения, если у составляющих его нет?

3.



Igor Ivanov [5/3/12 17:16](#)

Всё можно разложить по плоским волнам (это называется преобразование Фурье). В том числе, и закрученный свет. Это будет когерентная суперпозиция плоских волн с одинаковой частотой, но бегущих в разных направлениях.

Вопрос, откуда тут берется ОУМ, резонный, но боюсь простыми словами на него не ответишь. Давайте я вначале скажу правильно, т.е. математическим терминами, а потом посмотрим, потребует ли это объяснения.

Плоская волна есть собственное состояние оператора проекции углового момента на ось, в направлении которой и бежит плоская волна. Т.е. только при таком выборе опорной оси можно сказать, что у плоской волны имеется определенный ОУМ и он равен нулю. При любом другом выборе опорной оси нельзя вообще сказать, есть или нет у плоской волны какой-то ОУМ. Среднее состояние этого оператора, вычисленное по такому состоянию, по-прежнему равно нулю, но оно не является собственным состоянием оператора проекции углового момента на эту ось.

Закрученное состояние устроено так, что оно состоит из таких вот плоских волн, бегущих под углом к опорной оси, но при этом оно их них собрано так, чтоб уже являться собственным состоянием этого оператора.

4.



[Igor Ivanov5/3/12 17:23](#)

А теперь попробую пояснить на простой аналогии.

Предположим, вы рисуете картину в стиле пуантилизма — т.е. точечками. Все точки, которые вы можете ставить на бумагу — это идеально ровные кружочки. Т.е. каждая точка симметрична относительно вращений. Как же вы тогда сможете нарисовать несимметричную картину? Или картину с зеркальной симметрией?

Ответ простой. Каждая точка симметрична относительно вращений вокруг своей конкретной оси. Никто не утверждает, что все точки будут симметричны относительно какой-то единой оси. Поэтому если вы выберете за опору центр картины, то каждая конкретная точка вовсе не будет симметрична относительно вращений вокруг этого центра.

Так же и закрученный фотон. В нем спрятаны отдельные плоские волны, бегущие в разных направлениях. Каждая плоская волна имеет нулевой ОУМ относительно своей конкретной оси, а не относительно какой-то единой опорной оси. Поэтому их них и можно сострять состояние, имеющее иные свойства симметрии относительно выбранной опорной оси.

Так понятнее?

5.

[Анонимный6/3/12 07:30](#)

Спасибо, так понятнее. Возможно.

Правильно ли я понял, что необходимым условием волны с ОУМ является разное направление плоских волн, из которых она складывается? Если так, то правильно ли утверждение, что волна может иметь ОУМ только на некотором отрезке, так как является расходящейся?

6.



[Igor Ivanov6/3/12 12:24](#)

> ... необходимым условием волны с ОУМ является разное направление плоских волн, из которых она складывается?

Да, конечно. Иначе это по-прежнему будет плоская волна, пусть и с каким-то временным профилем.

> ... волна может иметь ОУМ только на некотором отрезке, так как является расходящейся?

Нет, не так. Во-первых, теоретически волна не обязана быть расходящейся. Можно построить так называемые бездифракционные пучки (например бесселевы пучки), которые словно постоянно сходятся и расходятся, так что их поперечный профиль не меняется вдоль оси z . Понятно, что это идеализация (так же, как и плоская волна);

в реальных экспериментах пучок будет вести себя бездифракционно только на какой-то длине, а дальше снова разойдется.

Но это даже и не обязательно. Можно взять и расходящиеся пучки с ОУМ (лагерр-гауссовы или бессель-гауссовы пучки), ориентированные вдоль оси z . Для них можно сосчитать полный момент импульса относительно этой оси при каком-то определенном z , и окажется, что он от z не зависит. Это и неудивительно, потому что момент импульса — сохраняющаяся величина.

7.

Олег [C6/3/12 17:47](#)

Большое спасибо. Не уверен, что все понял правильно, но мне достаточно.



8.

[Igor Ivanov6/3/12 18:48](#)

Вживую я бы картинки нарисовал и объяснил, а онлайн это всё долго получается.

21.

Анонимный [13/3/12 08:48](#)

Скажите, пожалуйста, может ли фотон с импульсом, направленным вдоль оси OX , и имеющий линейную поляризацию (электрическое поле) вдоль OY , иметь определенную проекцию момента (спина) $+1$ на ось OZ ?



1.

[Igor Ivanov13/3/12 12:11](#)

Спин и поляризация — по сути одно и то же свойство. Линейная поляризация означает, что фотон находится в суперпозиции состояния с проекцией спина $+1$ и -1 на ось z . И наоборот, чистая проекция спина $+1$ означает, что фотон имеет круговую поляризацию.

2.

Анонимный [14/3/12 19:19](#)

Вопрос, к сожалению, был сформулирован мною довольно абстрактно. Хотя он имеет прямое отношение к хорошо известному эффекту Зеемана. Итак, еще раз. Пусть вдоль вертикальной оси OZ направлено магнитное поле. Вблизи начала координат находятся возбужденные атомы, чьи энергетические уровни расщеплены магнитным полем. Обсуждаем дипольное излучение, связанное с переходами с изменением (уменьшением) магнитного квантового числа m на 1 . Известно, что при этом фотоны могут лететь в любом направлении. Если они летят вдоль оси OZ , то их поляризация круговая и они уносят момент (спиновый), равный потерявшему атому. С этим, кажется, ясно. Но если наблюдается излучение поперек магнитного поля, например, вдоль оси OX , то его поляризация - линейная,

параллельная оси OY . Однако такие фотоны тоже должны уносить момент с проекцией на ось OZ , равной 1. Это требует закон сохранения. Вопрос был именно о таких фотонах. Как устроен их момент? Если не спиновый, то ОУМ? А в таком случае корректно ли говорить о поляризации? А что можно сказать про момент фотонов при квадрупольных переходах? Там он должен быть больше 1, и спина явно недостаточно?

3.



[Igor Ivanov18/3/12 15:50](#)

Я прошу прощения, невнимательно вначале прочел ваш вопрос.

Фраза «фотон с импульсом, направленным куда-то» означает, что речь идет о плоской волне; в вашем случае, плоской волне вдоль оси OX . Если за ось квантования взять OZ , то любая плоская волна, бегущая не вдоль оси OZ , в том числе и бегущая вдоль OX , раскладывается в суперпозицию состояний с любой проекцией ОУМ на ось Z , от минус до плюс бесконечности. Однако среднее значение оператора ОУМ, сосчитанное по такой плоской волне, равно нулю. Т.е. в такой волне есть все ОУМ, но в среднем они компенсируются.

Далее, насчет излучения. Излучаемый фотон — это не плоская, а сферическая волна. Такие фотоны описываются так называемыми шаровыми векторами (по аналогии с шаровыми функциями для бесспиновой частицы). Эти фотоны обладают определенной мультипольностью и четностью, так что да, они несут и ОУМ тоже. При высшем мультипольном излучении действительно вылетает фотон, уносящий сразу несколько единиц ОУМ.

Подробнее см. в Ландау-Лифшице, том 4, параграфы 6, 7 и 46, 47.

22.

[Анонимный19/10/12 18:31](#)

А возможно закрутить звуковую волну? Вообще, играет ли какую-то роль природа волны - продольная, поперечная или скалярная?

1.



[Igor Ivanov19/10/12 18:44](#)

Возможно, недавно даже была [статья на эту тему](#). Там с помощью такой волны дистанционно вращали мелкие предметы. Природа не важна, состояние с орбитальным угловым моментом можно сделать и у скалярной волны, и у волны с внутренними степенями свободы.

23. 

[petrovich196919/10/12 21:31](#)

Здравствуйте, вы писали, что "это родной вращательный момент импульса, связанный с движением в пространстве." А если просто вращать источник света, будет ли свет закрученным?

1.



[Igor Ivanov19/10/12 21:35](#)

Если у вас есть источник, излучающий (приблизительно) плоскую волну, то от того, что вы будете вращать источник, (приблизительно) плоский фронт не изменится.

24.

[Сергей21/10/12 04:52](#)

Очень интересно. А что сохраняется? Голограмма вращается в обратную сторону?

1.



[Igor Ivanov21/10/12 14:06](#)

Голограмма не висит в пространстве, она крепится к установке, поэтому она не крутится. Но вообще, если фотон детектируется в состоянии с ненулевым ОУМ, то и вся установка, значит, берет на себя противоположный ОУМ.

25.

[Анонимный19/11/12 19:18](#)

<http://lenta.ru/news/2012/10/19/microspirallight/>

Созданы микроскопические излучатели закрученного света

Физики создали микроскопические кремниевые источники закрученного света, то есть света, состоящего из фотонов, имеющих орбитальный угловой момент. Работа опубликована в журнале Science, ее краткое содержание приводит сайт Университета Бристоля.

26.

[Анонимный11/4/13 18:02](#)

Надо бы уточнять для анонимусов, что энергия в виде ЭМ-волны, например, никуда не летит на самом деле. Правильнее говорить, что она просто распространяется с точки зрения наблюдателя и с течением времени её можно обнаружить не в том месте где она была ранее (константы известны даже школьнику). Не методом полёта и вращения и т.д., а... неизвестным науке способом. =)

1.



[Igor Ivanov22/7/13 12:24](#)

По-моему, эти два слова тут имеют идентичный.

Насчет неизвестного науке способа — это что, восстание против науки? :) Способ известен не только науке, но и студентам-физикам.

27.

[Анонимный22/7/13 12:07](#)

"... Она убедительно доказывает, что спиральный волновой фронт несет каждый фотон." По сути, ОУМ является степенью закрученности кванта (фотона) по аналогии с винтовым шнеком определённого шага резьбы. Шаг резьбы - длина волны, прошедший за ед.времени - частота. Единая амплитуда определит плотность потока (радиус и сечение тоннеля-магнитопровода) и привязывает его к энергии. Налицо все основные характеристики кванта. Может это и есть его сущность?

1.



[Igor Ivanov22/7/13 12:27](#)

Извините, но это какая-то пурга. Исходя из одной только визуальной схожести картинок, нельзя реально связывать друг с другом совершенно разные явления, а тем более кому-то из них (я не понял, правда кому) назначать «сущность». Для проведения физических аналогий нужно доказывать, что уравнения, определяющие законы движение, похожи.

2.



[Leonid Chumachenko22/7/13 14:09](#)

Да что же Вы батенька, сразу ругаетесь? "Сущность" отнесена к возможной геометрии фотона, его общей конструкции. Насчёт схожести картинок... - Часто-густо за внешним подобием таится Великий Принцип Аналогий, сила которого неоднократно испытана и неоспорима. Квантовая наука оперирует совершенно абстрактными понятиями, привязанными к вероятности, но это не мешает ей совать нос и описывать реальные природные явления. "Заткнись и считай" - один из основных девизов квантовой механики, не так ли? Лично меня не устраивает отсутствие устойчивой логики в понимании фотона, поэтому я склонен к позиции А. Эйнштейна, предполагающей неоткрытость какого-то важного параметра. Не могу я брать "на веру" то, что не имеет логики.

Похожесть уравнений и проведение физических аналогий... Хм-м... Возьмём, к примеру, гравитацию. Уравнения Ньютона и Эйнштейна: кроме гравитационной постоянной G , они не имеют ничего общего, как по форме, так и по физическому наполнению. Или попробуйте получить для кванта уравнение Максвелла из уравнения Шрёдингера - у Вас тоже ничего не получится, каждое имеет свою логику, набор параметров и по-своему описывает один и тот же объект.

Но всё это сейчас не столь важно. Игорь, а что Вы думаете об амплитуде фотонов разной частоты, как об одной из важных и обязательных характеристик волнового

процесса? Очень интересно Ваше мнение.
Заранее Спасибо!



3.

[Igor Ivanov22/7/13 15:29](#)

Извините вторично, но я считаю, что есть смысл серьезно обсуждать физические явления и уравнения с человеком, который реально в теме разбирается. А до этого я ограничиваюсь только ответами на вопросы. У меня есть сильное подозрение, постепенно переходящее в уверенность, что вы в квантовой механике не особо разбираетесь. Кстати, насчет «отсутствия устойчивой логики в понимании фотона» — см. мой старый пост <http://igorivanov.blogspot.com/2005/09/blog-post.html>

> Уравнения Ньютона и Эйнштейна

Во-первых, ОТО полностью воспроизводит ньютоновскую гравитацию в пределе слабых полей, поэтому это сразу означает, что одно есть расширение другого. Во-вторых, так у ОТО и явления-то другие, которые невозможны в ньютоновской гравитации, что ж удивительного, что у них уравнения разные?

> Игорь, а что Вы думаете об амплитуде фотонов разной частоты, как об одной из важных и обязательных характеристик волнового процесса? Очень интересно Ваше мнение.

Скажите, а что вы думаете о числе 1 как о важной характеристике целых чисел?

Вы поймите, что вопрос насчет мнения осмысленно задавать ученому (а не продвигателю лженаучных гипотез), только если предмет реально не до конца понят наукой, когда есть разные мнения у тех ученых, которые над ним работают. То, что вы спросили, относится к стандартному университетскому курсу квантовой механики, 3 курс 2 семестр, квантование электромагнитного поля. Тут нет моего мнения, тут есть установленный факт. Амплитуда фотона (и тут сразу же возникает слово «фотон», которое ой как многозначно и про которое можно должно говорить!) в его _стандартном понимании_ определяется условием нормировки в выбранном нормировочном объеме.

28.

[Анонимный22/7/13 13:02](#)

Исходя из электродинамики, радиальный характер тока смещения обязан вызывать закручивание электромагнитного кванта вправо, либо влево (в квантовой науке спин +1 или -1)



1.

[Igor Ivanov22/7/13 13:15](#)

Вы невнимательно прочитали пост и не обратили внимание на то, что спин и закрученность — это два совершенно разных явления, см. подробнее следующий пост: <http://igorivanov.blogspot.be/2011/05/oam-2.html>

2.

Анонимный [22/7/13 15:09](#)

Да, в самом деле, спасибо.

29.

[Владимир 28/7/13 11:18](#)

Игорь, вот цитата из Вашего текста: "Закрутить волну можно и сильнее, организовав на полном обороте набег фаз кратный 2π . Зависимость от угла будет $\exp(im\phi)$ с каким-то целым числом m ." Вопрос: "Но вроде как при большом m волна крутится медленнее, чем при малом. Зафиксировав фазу получаем $\phi = \omega t / m$."

1.



[Igor Ivanov 28/7/13 13:14](#)

Что такое ϕ в этой формуле, вам понятно? ϕ — это азимутальный угол. Приравнивать общую фазу ωt не надо, это не очень осмысленная процедура. Эта процедура означает, что вы отказываетесь рассматривать все фазы волны, а хотите рассматривать только те, для которых в данный момент времени фаза равна ωt . Зачем такое искусственное ограничение?

Поэтому не будем так себя ограничивать, а просто обозначим фазу через Ψ (чтоб не путать с ϕ). Тогда формула такая: $\phi = \Psi / m + 2\pi k / m$ (вспоминаем, что при делении на целое углы становятся многозначными).

Вот ЭТА формула интерпретируется так: волна достигает фазу Ψ (в заданный момент времени и в данной точке вдоль луча) при азимутальных углах вот таких. Тот факт, что на m делится, означает, что для большого m будет много точек, которые будут плотнее стоять по азимутальному углу, т.е. волна будет по азимутальному углу накручиваться сильнее (ну естественно, m раз на весь оборот в 2π). Поэтому большие m означают более быструю осцилляцию по углам, т.е. более быстрое вращение.

2.



[Igor Ivanov 28/7/13 13:33](#)

А, не, я понял, на что вы хотите обратить внимание.

Поскольку $\phi = \Psi / m + 2\pi k / m$, то углы с одинаковой фазой находятся близко друг к другу. Значит, за время полного периода волны ей по азимутальному углу надо прокрутиться не на полный оборот, а всего лишь на $2\pi / m$. Т.е. _в этом смысле_ угловое вращение становится медленнее, вы тут правы, я беру свои претензии обратно.

Но с другой стороны, некая эффективная _длина волны_, отвечающая азимутальному вращению, становится меньше. А значит, отвечающий ей импульс - больше.

Но с третьей стороны, как я сейчас вспоминаю, поперечный импульс в закрученной волне вовсе не связан с закруткой, а контролируется совсем иным параметром. Т.е. его можно сделать и больше, и меньше при неизменном m . Поэтому, возвращаясь к исходной фразе, слова «"Закрутить волну можно и сильнее» вовсе не подразумевают «увеличить угловую скорость кручения». Они подразумевают «увеличить орбитальный угловой момент волны», а ее связь с другими величинами уже не столь прямолинейна.

Тем не менее, спасибо за коммент, я тут что-то забыл на минуту про эту тонкость.

30.

[Владимир28/7/13 19:03](#)

На всякий случай, давайте зафиксируем эту тонкость. Увеличение орбитального момента происходит с уменьшением "угловой скорости кручения фазы". Какой никакой, а парадокс. До сих пор же все "вертелось" вокруг спирального фронта (скорости вращения фазы во времени), а теперь, оказывается, что зависимость "обратно-пропорциональная". Говорилось - вот сделаем спиральную моду - частицы будут крутиться...

1.



[Igor Ivanov29/7/13 19:04](#)

Я подумал, что полезнее будет вынести мой ответ в отдельный пост: [Вращение закрученной волны](#).

31.

[Владимир28/7/13 21:29](#)

Извините, но меня коробит, что я наделал несколько грамматических ошибок. Исправляю! Добавляю короткую фразу в самом конце.

Я очень Вам благодарен за Вашу просветительскую деятельность по сложным вопросам современной физики. Объяснение "своими словами", да еще в живом общении - это очень эффективный способ популяризации науки.

Я знаком с классическими работами по спиральным модам, но не все понимаю. С квантовой механикой знаком в общих чертах, а не в деталях. Классики, действительно, свели спиральность моды к свойству фотона, поместив в одну скобку порядок моды и спин фотона. Вот и Вы озаглавили свою статью как "Орбитальный угловой момент фотона". Вот открыл том курса Ландау "Квантовая электродинамика", параграф "Поляризация фотона". Там есть некая обобщающая фраза: "Состояние фотона с импульсом и поляризацией есть чистое состояние, оно описывается волновой функцией и соответствует полному квантовомеханическому описанию частицы (фотона). Ни о каком орбитальном моменте фотона нет никакого упоминания. Допускаю, что наука движется вперед и Ландау (его соратники, авторы тома) что-то недоучли, но хотелось бы получить дополнительное подтверждение этому факту. Тому, что фотон обладает еще одной характеристикой с "квантовым числом", равным номеру Лагерр-Гауссовой моды, который может быть гораздо больше спина, и что фотон может двигаться по спирали (раз у него есть орбитальный момент).

1.



[Igor Ivanov29/7/13 19:11](#)

Спасибо за отклик :)

Насчет ЛЛ - вы их не обижайте. В том 4 ЛЛ есть параграф 7, Сферические волны фотонов, как раз перед «Поляризацией», и там описываются фотоны, несущие орбитальный угловой момент. Это всё было известно давным-давно, но просто всё рассмотрение долго ограничивалось только именно сферическими волнами. А то, что бывают цилиндрические и они тоже несут ОУМ, как-то классикам не казалось особо интересным. Но когда пошли лазеры, узконаправленные световые пучки с какими-то определенными поперечными модами, когда поняли, что этими модами можно управлять (расщеплять луч, делать фазовые сдвиги, накладывать снова друг на друга), вот тогда про закрученный свет заговорили серьезно.

Ну и долгое время «мешалось» общее утверждение, что трехмерные операторы спина и ОУМ для произвольного светового поля, строго говоря, неразделимы. Но как оказалось, в параксиальном приближении вполне можно говорить про разделение их z-компонент.

32.



[Alexander P15/12/13 14:01](#)

Ув. Игорь, по поводу фотонов, методическое пояснение, Есть фотоны и есть кванты поля - соотв. поля бывают разными. Фотон по определению есть квант монохроматического поля см. Любые формулы-определения в стандартных школьных учебниках - ЛЛ, с манией величия таки надо бороться. Что касается "фотонов" новых нетривиальных конфигураций эм поля - всяких "закрученных фотонов" то лучше говорить кванты соотв. поля. Подчеркну банальный факт - эм поле система с бесконечными степенями свободы - при соответствующих граничных условиях получают некое суперпозиционное состояние - оно описывается некой матрицей плотности - это некое когерентное 'коллективное' состояние поля не сводящееся к одному фотону - естественно оно квантуется, но это не те пчелы - матрица плотности. Понятно, есть жаргонизмы, но при популяризации все замыливается, зачастую и, как правило, с водой выплескивают ребенка и начинается словесный понос...

1.



[Igor Ivanov15/12/13 23:21](#)

А зачем вы этот комментарий оставили в нескольких экземплярах на Элементах в обсуждении новости? Вы бы стерли лишние комментарии и оставили только один.

Что касается сути, то я не понял, с какой стати вы заговорили о матрице плотности. Речь идет про однофотонные неплосковолновые состояния. ЭМ поле вполне можно проквантовать и в базисе гаусс-лагерровых состояний, со своим фоковским состоянием, с операторами рождения и уничтожения таких фотонов и т.п.

Если вам *не нравится* такое использование слова «фотон», можете так и сказать, но в общем-то это вполне распространенное использование.

2.



[Alexander P17/12/13 22:03](#)

Несколько сообщений как-то получилось при освоении разнородной комп техники браузеры там всякие, непонятно было где там живой тред, стереть не проблема. По поводу матрицы плотности - я хотел подчеркнуть тот факт, что эти новые нетривиальные 'перекрученные' состояния- суперпозиционные состояния эм поля, возбуждение не одночастичное, в духе фотон 1пл-волна(по энциклопедиям-учебникам). Т.е. эти состояния эм поля в базисе плоских волн можно описывать матрицей плотности, конечно, мы можем вторично проквантовать, и перейти к удобным собственным функциям 'квазичастицам' где матрица диагональна - так сказать, редукция. Аналогия-пример: стоячие волны в резонаторе, куперовские пары электронов. Игорь, прочитал вашу последнюю статью - хорошо написана, ежу понятно, что вы все правильно понимаете, странно ежели было бы наоборот. :-)

Понятно, что базовые понятия употребляются в более широком смысле, однако народ не даром задает по многу раз одни и те же детские вопросы. Надо структурировать знание. Мне нравится это выражение из молодости - программирование должно быть структурным - знание должно быть структурным и т.д... но тот, кто посмотрит на то, как устроена виндоус у того... или как устроены школьные учебники... отвлекся немного. По поводу слов - не нравится - об этом речи нет — я просто подчеркнул, что спор о фотонах в народе возник из-за трактовки термина, и вы в первых статьях ентот вопрос не четко, особенно ув. С. Попов про неправильных пчел и неправильный мед - (можно ему это переслать я пока не сообразил :-)).

Кстати, вот, методический детский вопрос на обсуждение моно вынести - каков правильный ответ-почему атом стабилен - например Н, НД, Не

3.



[Alexander P17/12/13 22:26](#)

Кстати, тема матрицы плотности это тоже очень интересный методический вопрос. Если состояние суперпозиционное - описываем матрицей плотности - Чисто квантовый эффект.

4.



[Igor Ivanov17/12/13 23:20](#)

Да, лишние посты лучше бы вы стерли.

По поводу фотонов я еще раз говорю — это чистые одночастичные состояния, матрица плотности для них не требуется.

Остальная часть вашего комментария — это, честно говоря, поток сознания, я не вижу, на что тут реагировать. Вы бы более четко излагали свои мысли, что ли.