

О проблемах рентгеновской оптики

Виктор Кон, 07-05-2021, сайт: <http://kohnvict.narod.ru>

Я решил написать эту статью после того, как получил для ознакомления и выдачи своей оценки солидный документ на много страниц и с большим числом ссылок, в котором излагалась многолетняя работа авторов и их, так сказать, понимание науки в целом и своего места в ней. В этой работе было много высказываний общего характера наряду с изложением конкретных результатов. С интерпретацией некоторых из этих результатов, а также с общими высказываниями я не вполне согласен. Я решил авторов не называть, а ответ для них написать в общей форме, потому что наверняка это всем интересно, а молодежь, да, возможно, и не только молодежь, не знает этого.

То есть я решил поступить по рецепту одной мудрости, которую можно сформулировать так: "никогда не спорь, просто повторяй свои аргументы". Я просто хочу изложить свою точку зрения о тех проблемах, которые существуют в оптике вообще и в рентгеновской оптике особенно. Разумеется о всех проблемах не расскажешь, но выбор проблем уже сделан. Я попробую изложить свои точки зрения на вопросы о том, что такое фотон, что такое когерентность и есть ли возможность открыть что-то новое.

Что такое фотон.

Казалось бы, какие тут проблемы? Это слово знают даже дошкольники, уже постепенно исчезает слово "оптика", его заменяют словом "фотоника". Астрономы ловят в свои телескопы фотоны, которые летели в космосе миллионы лет, и с ними ровным счетом ничего не происходило. Существует эффект рождения электронно-позитронной пары из фотонов. В кристаллах его даже давно уже наблюдают. Правда в вакууме он пока еще не реализован, но разговоры уже идут. У новых рентгеновских лазеров как будто лишь немного энергии не хватает.

Информацию легко получить в интернете. В википедии написана очень большая статья [1] про фотон. Есть стандартная модель, и в ней есть частицы – бозоны, которые переносят взаимодействие между частицами – фермионами. Фотон – такая частица. Даже подсчитано сколько всего фотонов есть во Вселенной. И в то же время сразу противоречие. Там же написано, что фотон обеспечивает электромагнитное взаимодействие, а виртуальные фотоны являются квантами-переносчиками электромагнитного поля. Первая часть фразы лично мне не понятна, но она соответствует общей структуре стандартной модели. А вторая часть фразы непонятна совсем.

Еще там есть фраза, что фотон – это элементарная частица, не обладающая строением и размерами. То есть точка в пространстве и времени. Я сам так часто считал для удобства, но вот мой начальник (академик Каган) считал, что фотон заполняет все то пространство, где есть электромагнитное поле, которое распространяется со скоростью света. Прямо противоположные точки зрения у людей, которые, тем не менее, все правильно делали на практике. Потому что не важно как ты понимаешь, важно как ты считаешь. Эта фраза появилась после создания квантовой механики. Мы перестали понимать что мы делаем.

И одновременно до сих пор находятся люди, которые считают, что нет никаких фотонов, это такая же сказка, как бог Зевс, живущий на горе Олимп. Одним из ярких представителей таких людей был Виталий Аристов. В Википедии и про это написано. Да, было много людей, которые были не согласны с фотонами. Например, Аристов считал, что главным виновником появления фотонов является эффект Комптона, который уравнения Максвелла объяснить не могут. И вот он хотел это исправить, то есть объяснить эффект Комптона без понятия фотона. Были попытки так же точно объяснить и эффект фотоэлектронной эмиссии и другие эффекты.

У меня на компьютере накопилось много книг про оптику и фотоны, я их не читал, потому что они были написаны недавно, а я учился давно и по другим книгам. Но вот я запомнил, что в одной из них говорилось что бывают разные фотоны, пока не могу найти

ссылку на эту книгу. Почему разные? А потому, что так получается. Есть теория Планка, который пытался объяснить излучение черного тела и ему пришлось ввести квант энергии излучения, равный $\hbar\omega$ (\hbar – постоянная Планка, деленная на 2π , ω – частота, умноженная на 2π , то есть круговая частота).

В этой теории получается, что квантуется только монохроматическое излучение заданной частоты, а излучение разных частот имеет разные фотоны. Не очень понятно, если подумать. Ведь монохроматического излучения в природе не бывает. Такое излучение имеет бесконечные размеры и бесконечное время жизни.

А что бывает? Бывают, например, атомы, которые согласно квантовой механике, имеют разные энергетические состояния и при переходе из одного состояния в другое они поглощают или излучают – что? Правильно, фотоны. Это характеристическое излучение, и как раз такое излучение и открыл Рентген. Когда переходы происходят на самых внутренних оболочках атомов, возникает излучение с энергией фотонов от 1 до 100 кэВ.

Но это излучение имеет конечное время жизни, и значит оно не монохроматическое, а квазимонохроматическое, потому что ширина энергетического спектра такого излучения составляет величину менее 0.001 от энергии фотона. Но все равно спектр есть, значит это другие фотоны. Они имеют частоту и время жизни. Причем время жизни у них очень короткое по сравнению с временем измерения.

Но и это еще не все. У человека есть глаза. И в книгах описывали эксперименты, в которых человек в кромешной тьме после определенного навыка может видеть очень слабый свет. И этот свет приходил вспышками, импульсами. Он реально имеет короткое время жизни и какую-то частоту (цвет), а также локализован в пространстве. Глаза можно считать прибором для измерения света. Но есть и реальные приборы, причем есть приборы, которые умеют измерять электромагнитное излучение дифференциально по координате или времени.

Я 18 лет ездил в Гренобль, на источник синхротронного излучения (СИ), который буду называть ESRF, и общался там с экспериментаторами, причем разными. Иногда и сам бывал на станциях и видел как делаются эксперименты. Есть там станция по изучению эффекта Мессбауэра.

Этот эффект состоит в том, что если ядерную систему облучить очень коротким во времени импульсом, то потом возбужденные ядра высвечивают излучение очень узкого спектра и очень долго по сравнению с временем импульса. В ESRF раньше для этих экспериментов включали однобанчевую моду, то есть импульс длительностью меньше одной нс (наносекунды) проходил с интервалом более 200 нс.

А время высвечивания одного ядра изотопа 57 железа было 144 нс. Я являюсь автором работы, в которой теоретически было показано, что система ядер в кристалле высвечивает импульс быстрее. Вот снова парадокс. Казалось бы здравый смысл подсказывает, что время должно увеличиваться, а оно уменьшается.

И вот для проверки этой теории после каждого импульса включался детектор (на время самого импульса он выключался), который имел много временных каналов шириной 1 нс каждый. Что происходило. Детектор фиксировал один импульс (прибавлял к подсчету) после 100 и более импульсов СИ. То есть очень много импульсов не давали ни одного импульса в детектор.

Время шло и в разных каналах накапливались числа. Каждый канал можно было представить как детектор, который открывался на 1 нс с заданной задержкой, остальное время был закрыт. То есть излучение реально имело короткое время, потому что два и более детектора одновременно ничего не фиксировали.

По мере поступления данных компьютер рисовал кривую. Это был хаотический и случайный набор пиков. Было такое ощущение, что включен генератор случайных чисел. И только после большого промежутка времени начала вырисовываться та самая кривая, которую мы вычислили теоретически, причем с большим шумом, то есть у точек был случайный разброс определенной амплитуды.

Время шло дальше и кривая становилась все более четкой, а шум уменьшался. Теория подтверждалась, но странным образом, точнее статистически, при очень большом числе отсчетов, которые тоже иногда называют фотонами. За один импульс СИ детектор измерял не более одного фотона. Это потому что очень высокой интенсивности СИ не хватало. У СИ очень широкий спектр, а выделялись фотоны, у которых спектр был в 10^{-12} раз меньше, число пишу по памяти, могу ошибиться, надо смотреть статьи.

Недавно были сделаны эксперименты такого же типа, когда интенсивность источника СИ выросла и за одну вспышку детектор ловил больше одного фотона. И сразу возникли проблемы. Теория не изменилась, но специфика появилась.

А что было в теории? А там просто решались уравнения Максвелла для электрического поля излучения (магнитное поле было просто равно производной по времени от электрического поля) в которых взаимодействие излучения с веществом рассматривалось квантово-механически, а никаких фотонов не было. Интенсивность излучения равнялась квадрату модуля функции электрического поля.

И вот эта интенсивность сравнивалась с числом фотонов, которое измерял детектор и при правильной нормировке и хорошей статистике (много фотонов) результаты совпадали с очень высокой точностью. А когда мало фотонов получался просто набор случайных чисел.

Такая же ситуация происходит и с распределением пространственной зависимости излучения с помощью ПЗС матрицы. Если источник имеет слабую интенсивность или время экспозиции слишком короткое, то картинка шумит, а может и вообще ничего не быть. Только когда много фотонов теоретический результат совпадает с экспериментом. Но снова повторяю – это уже снова совсем другие фотоны.

Ситуация выглядит более, чем странно. Теория всегда описывает гладкие кривые, причем часто в каких-то приближениях, которые с точки зрения здравого смысла нереальны, например, плоская монохроматическая волна. А экспериментально получаются дискретные результаты в виде набора чисел, каждое число в конкретной точке или в конкретное время. И все совпадает отлично, если числа большие.

И самое неприятное состоит в том, что разные явления описываются разными теориями, иногда в них присутствуют фотоны, иногда нет. А эксперимент тоже как бы имеет дело с разными фотонами. И это как-то никого не беспокоит и не волнует.

Лично я работаю в теории, в которой нет никаких фотонов и они не нужны. Просто уравнения Максвелла все описывают. Но это не совсем так. Нужно учитывать когерентность, то есть свойства источника. Уравнения Максвелла правильно описывают только излучение точечного источника и монохроматическое. Для учета размера источника и спектра необходимо суммировать интенсивность излучения по координатам источников и по спектру. Почему так я напишу дальше.

Что такое когерентность

Когерентность – понятие очень старое, про нее было написано еще в книгах первой половины 20-го века. Но, разумеется, уже после создания квантовой механики. Про это написано во всех учебниках, включая книгу Борна и Вольфа. Разумеется есть статья об этом и в википедии [2]. Там, кстати, есть ссылка на более позднюю книгу Мандела и Вольфа. В этой статье написано немного, но все самое главное есть.

Что тут важно понимать? Есть разные ситуации и все зависит от конкретных условий эксперимента. Вообще говоря, пространство и время часто разделяют и когерентность делят на пространственную (поперечную) и временную (продольную). Рассмотрим временную. В указанной выше теории эффекта Мессбауэра система ядер возбуждается мгновенным импульсом, а потом изучается излучение этой системы и необходимо решать уравнения Максвелла с зависимостью от времени.

И это когерентный процесс во времени. Все, что получается в результате решения уравнений Максвелла является когерентным, потому что в этих уравнениях нет хаоса и случайности, там все связано причинно-следственными связями. Мгновенных импульсов

может быть много, но если детектор включается через какое-то время после каждого импульса и потом снова выключается, то процесс все равно остается когерентным. Потому что есть четкая связь между временами возбуждения и регистрации.

Но есть и другие ситуации, когда моменты облучения системы случайны, не предсказуемы, а время взаимодействия очень короткое. И плюс время регистрации очень большое, так что за это время происходит очень много вспышек излучения (фотонов) со случайными начальными фазами, определяемыми моментом вспышки. Про такую ситуацию тоже написано в книгах.

Но много лет назад возник спор и Афанасьев заставил меня написать короткую заметку, что я и сделал, вот ссылка [3]. Я даю ссылку не на журнал, а на мой сайт, откуда статью можно скачать, журнал там указан. Там коротко написано что происходит в этом случае. В двух словах надо сделать расчет временной зависимости взаимодействия всех импульсов (фотонов) с образцом с учетом их начальных фаз. Проще всего это сделать представляя временную зависимость в виде интеграла Фурье и суммируя все фотоны.

Так как детектор измеряет интенсивность как квадрат модуля функции электрического поля, то надо взять этот квадрат и потом проинтегрировать его по начальным временам всех фотонов. Результат получается таким, что суммируются квадраты модуля отдельных монохроматических гармоник излучения.

То есть учет случайного характера моментов излучения вспышек (фотонов) при большом времени экспозиции (стационарный процесс) приводит эффективно к такому рецепту расчета. Рассматриваем уравнения Максвелла только для монохроматического излучения. Только оно является когерентным. А если реальное излучение имеет спектр, то необходимо проинтегрировать интенсивность гармоник с весом пропорциональным спектру.

Разумеется, я рассмотрел только предельные случаи, могут быть и более сложные ситуации, но я про такие ни разу не слышал. Да, монохроматического излучения в природе нет, но если делается стационарное измерение за большое время, то необходимо разлагать излучение в спектр, решать уравнения Максвелла только для монохроматических гармоник, а потом интегрировать интенсивность по спектру. Могут быть и другие схемы расчета, но они не будут более удобными и простыми.

Перейдем к координате. Тут ситуация простая. Современные источники, то есть трубка и СИ (не знаю про лазер) светят так, что каждая точка поперечного сечения имеет сбитую фазу. Значит надо делать расчет для точечных источников и потом суммировать по ним интенсивность. Я не пишу формул, они есть в википедии, в учебниках и статьях.

Снова хочу сказать, что можно делать и по другому, но это не будет проще и быстрее. Например, есть любители считать двойные интегралы вместо однократных (ось X), или четверные вместо двукратных (оси X, Y) и вводить функцию взаимной когерентности, но это просто долго считать с тем же ответом.

Например, в простой схеме: источник, объект, детектор, учет размера источника выполняется при расчете свертки картинки для точечного источника с проекцией размера источника на детектор. Свертка считается очень быстро методом FFT (быстрого преобразования Фурье). Печально, что до сих пор есть люди, которые этого не понимают. А иногда зависимость от координаты точечного источника можно получить в аналитическом виде и для более сложных ситуаций. Тогда снова расчет простой.

Но бывают и более сложные ситуации. В теории рентгеновской оптики это относится, в частности, в эффекту полного внешнего отражения (ПВО). Так получилось, что очень давно было найдено решение для плоской монохроматической волны в виде формул Френеля. Затем это решение было обобщено для многослойных систем в виде рекуррентных формул Паррата. Также еще в 50-х годах прошлого столетия. И все. До сих пор никакого другого решения не найдено и все эксперименты сравниваются с расчетами для плоской монохроматической волны.

Что касается монохроматической волны, то тут все правильно. Как я написал выше, так и надо делать. А спектр надо учитывать интегралом интенсивности. А вот с плоской волной есть проблемы. И не удивительно, что результаты экспериментов в этой области не всегда совпадают с экспериментом.

Справедливости ради следует сказать, что были работы, когда падающую волну разлагали по плоским волнам в интеграл Фурье, решали задачу для плоских волн, а потом снова считали интеграл. Это очень хорошо работает для брэгговской дифракции, сам знаю по своему опыту. Были работы, когда результаты расчета идеально совпадали с экспериментом. Но вот в случае ПВО и особенно многослойных систем работ, где все хорошо, лично я не знаю.

Естественно, что в экспериментах стараются коллимировать падающий пучок, но получить плоскую волну на всей поверхности образца, которая, с одной стороны, большая, с другой, конечная, весьма не просто.

Разумеется, еще более сложная ситуация имеет место быть в щелевых волноводах, как впрочем и в оптических волноводах и капиллярах. Построить точную теорию в таких системах в настоящее время не представляется возможным, а то, что делается, это можно определить как "не стреляйте в пианиста, он играет как умеет". Короче, делаем что умеем, а не то, что надо.

Есть ли возможность открыть что-то новое

Вопрос интересный, но не точно сформулирован. Речь идет о том, чтобы открыть экспериментально что-то такое, что не описывается современной теорией. Под теорией я буду подразумевать уравнения Максвелла и квантовую механику для описания взаимодействия излучения с веществом.

Мой ответ будет таким – и да, и нет. Я буду опираться на свою практику. Я в своей жизни решал много задач рентгеновской оптики. Но я брался только за такие задачи, которые я умел решить адекватно, то есть практически точно, пусть и численно. Под адекватностью я имею в виду учет всех особенностей эксперимента.

И вот такие теоретические расчеты всегда совпадали с экспериментом весьма точно. Бывало, что иногда было необходимо вводить подгоночные параметры, так как про образец не все было известно. В таких случаях могли быть небольшие разногласия. Но в задачах, где все было известно про образец, совпадение расчета с экспериментом было идеальным. Кривые ложились одна на другую независимо от того, как бы сложно они не выглядели. Это было и в мессбауэровских спектрах, и в многоволновой дифракции, и в интерференции.

То есть современный теоретический аппарат рентгеновской оптики, несмотря на то, что есть очень сильное различие между уравнениями Максвелла и экспериментальными методами регистрации, абсолютно адекватно описывает природу. Но есть другой аспект у этого вопроса. К сожалению, не все задачи теория способна решить, даже при достаточно мощной компьютерной технике и методах расчета.

Например, адекватный расчет фокусировки с помощью зонных пластинок возможен в одномерном случае, а в двумерном – нет, не хватает мощностей компьютеров. Я уже упоминал задачу о щелевом коллиматоре на основе ПВО. Вообще ПВО еще решается не вполне адекватно. Там можно измерить много такого, что даже на пальцах объяснить невозможно. Но это просто трудности теории, что многие задачи решаются только для плоской падающей волны.

Но есть и другие примеры, когда очень легко решить теоретическую задачу, а эксперимент сделать невозможно. Так, например, в 1988 году я открыл теоретически эффект полного отражения в запрещенный рефлекс при многоволновой дифракции. А измерить это удалось только через 20 лет и то в США.

То есть принципиальная возможность решить любую задачу есть, так как уравнения Максвелла в экспериментах с большим числом фотонов описывают природу очень хорошо и

это доказано на огромном числе примеров. Для частиц есть уравнение Шредингера, которое во многих случаях принципиально ничем не отличается от уравнения Максвелла. То есть можно снова обнаружить близкие эффекты.

Но имеет значение также и величина параметров. Например, для оптики видимого света коэффициент преломления больше единицы и намного, а для рентгеновского излучения он меньше единицы и отличие очень слабое. По этой причине фокусирующие линзы в оптике видимого света выпуклые, а в рентгеновской оптике они вогнутые.

Некоторых смущает, что фазовая скорость рентгеновского излучения больше скорости света, но вогнутые линзы реально фокусируют. Просто надо понимать, что это происходит в стационарных условиях, когда скорость не измеряется. Есть просто сдвиг фазы монохроматической волны, которая в природе не существует. И скорость тут рассматривается чисто формально. Скорость могут иметь только объекты локализованные в пространстве.

Интересными являются также резонансные явления. Например, мне приходилось теоретически изучать влияние шероховатости поверхностей в интерферометре Фабри-Перо [4]. Этот прибор в чем то похож на волновод. Там используется Брэгговское отражение в двух кристаллах, разделенных воздушным промежутком.

Отражение может достигать 99%, но если лучи набирают в промежутке фазу 2π , то пучок проходит через интерферометр как по маслу. А если нет, то нет. Фаза зависит от длины волны, то есть получаем идеальный монохроматор. И эта задача хорошо решается теоретически, правда сравнение с экспериментом не проводилось. Но там не рассматриваются последовательные отражения а сразу решается самогласованная задача. И таких задач в теории много.

Ссылки

[1] <https://ru.wikipedia.org/wiki/Фотон>

[2] [https://ru.wikipedia.org/wiki/Когерентность_\(физика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Когерентность_(физика))

[3] <http://kohnvict.narod.ru/articles/011r.pdf>

[4] <http://kohnvict.narod.ru/articles/114.pdf>