

3/ix-79

3401/2-79



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

ор-833

P2 - 12429

И.М. Франк

ЭЙНШТЕЙН И ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ

К столетию со дня рождения Альберта Эйнштейна

1979

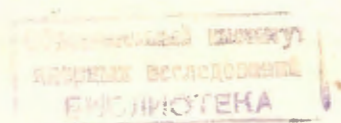
P2 - 12429

И.М.Франк

ЭЙНШТЕЙН И ПРОБЛЕМЫ ОПТИКИ

К столетию со дня рождения Альберта Эйнштейна

Направлено в УФН



P2 - 12429

Франк И.М.

Эйнштейн и проблемы оптики
/к столетию со дня рождения Альберта Эйнштейна/

Доклад, прочитанный 2 марта 1979 г. в Берлине на сессии Академии наук и физического общества ГДР, посвященной столетию со дня рождения Альберта Эйнштейна.

Рассмотрены некоторые положения специальной теории относительности и квантовой теории излучения Эйнштейна, а также следствия из них. Обсуждаются главным образом две проблемы: вопрос о скорости, превышающей скорость света в пустоте, и эффект Допплера в среде в его классической и квантовой интерпретации.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1979

Frank I.M.

P2 - 12429

Einstein and Problems of Optics
(Talk on the Occasion of 100 th Birthday of
A.Einstein)

The talk was delivered on March 2, 1979 in Berlin at a special session of DDR Academy of Sciences and Physical Society of DDR devoted to 100 th birthday of Albert Einstein. Some aspects and conclusions of Einstein special relativistic theory and quantum theory of radiation are discussed. Much attention is given to the following problems: on velocity exceeding the velocity of light in vacuum, and on the Doppler effect in medium in both classical and quantum interpretation.

The investigation has been performed at the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1979

Предложение Академии наук ГДР выступить с докладом, посвященным столетию со дня рождения Альберта Эйнштейна, было для меня неожиданным *. В самом деле, у меня нет работ по теории относительности, и я не могу считать себя специалистом в этой области. Было бы трудно выступить и в роли историка науки, т.к. проблемой развития идей, связанных с теорией относительности, я никогда специально не занимался. Поэтому всего естественнее было бы поблагодарить за оказанную честь и отказаться от доклада. Все же возникли сомнения, связанные с тем, что Эйнштейн оказал на физиков нашего поколения огромное влияние. Я обратился к четырехтомному собранию научных трудов Эйнштейна, изданных на русском языке в серии "Классики науки"^{1-4/}. Это чтение принесло чувство радости, восхищения и вместе с тем понимания того, что многие из близких мне результатов могут служить иллюстрацией к основополагающим работам Эйнштейна или же полезны для их обсуждения. Отсюда согласие сделать доклад, несмотря на очевидную трудность этой задачи.

Сообщение озаглавлено: "Эйнштейн и проблемы оптики". Для обсуждения избраны две проблемы - вопрос о скорости, превышающей скорость света, и эффект Допплера в преломляющей среде в его классической и квантовой интерпретации. Обе проблемы органически связаны со знаменитыми работами Эйнштейна 1905 г.: работой, в которой была сформулирована теория относительности **^{5/} и работой, заложившей основы

* Доклад, прочитанный 2 марта 1979 г. в Берлине на сессии Академии наук и Физического общества ГДР, посвященной столетию со дня рождения Альберта Эйнштейна.

** Zur Elektrodynamik bewegter Körper^{5/}. См. ^{1/} стр. 7-35.

квантовой теории излучения* ^{/6/}. Вклад Эйнштейна в развитие проблем оптики, разумеется, значительно шире того, о чем я буду говорить. Мой доклад я прошу рассматривать лишь как некоторую иллюстрацию роли трудов Эйнштейна для этой области физики.

Мировая слава Эйнштейна особенно широко распространилась среди физиков всего света после окончания первой мировой войны ^{/7/}. Мне кажется, это было особенно существенным для науки молодого Советского государства. До Октябрьской революции 1917 г. имя Эйнштейна было у нас известно только узкому кругу ученых - специалистов в области теоретической физики ^{**}. Положение резко меняется с начала двадцатых годов. Знаменитая лекция Эйнштейна "Геометрия и опыт" ^{/10/}, прочитанная в Академии наук в Берлине в январе 1921 г. ^{***}, уже в следующем, 1922 году, выходит на русском языке. В том же году выходит книга "О физической природе пространства" ^{/11/}, содержащая и эту лекцию и статью "Эфир и теория относительности" ^{****/12/}. Для русского издания Эйнштейн пишет предисловие.

За этим следует целая серия книг Эйнштейна, изданных на русском языке. Только в период 1921-23 гг. я насчитал семь книг ^{*****}.

Популярность Эйнштейна в нашей стране уже тогда была исключительной, а широкое распространение книг по теории относительности - свидетельство жадного интереса молодой советской науки ко всему новому и прогрессивному, что происходит в мире. Однако для советской науки характерно не просто овладение знаниями. В 1922 году появляется знаменитая теперь статья ленинградского ученого Александра Фридмана ^{/23/} "О кривизне пространства" ^{*****}.

* См. ^{3/} стр. 92-107. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt ^{/6/}.

** Мне известны только две публикации работ Эйнштейна на русском языке, изданные до 1917 г. /см. ^{/8,9/}.

*** См. ^{/2/} стр. 83-94.

**** См. ^{/1/} стр. 682-689.

***** См., например, ^{/13/}.

***** См. также ^{/14,15/}.

Хорошо известно, что Эйнштейном в 1917 г. были заложены основы новой науки - релятивистской космологии ^{/16/}. Фридман сделал здесь следующий шаг, все исключительное значение которого раскрылось лишь позже.

Два своих теперь широко известных постулата теории относительности Эйнштейн формулирует так ^{/5/}: "...для всех координатных систем, для которых справедливы уравнения механики, справедливы те же самые электродинамические и оптические законы..." "Это предположение /содержание которого в дальнейшем будет называться "принципом относительности"/, мы намерены превратить в предпосылку и сделать, кроме того, добавочное допущение, находящееся с первым лишь в кажущемся противоречии, а именно, что свет в пустоте распространяется с определенной скоростью c , не зависящей от состояния движения излучающего тела" ^{*}. Пожалуй, самое поразительное в этой работе то, как устраняется Эйнштейном это кажущееся противоречие. Нужна была гениальность Эйнштейна, чтобы заметить, что, казалось бы, очевидное понятие одновременности на самом деле требует определения. Для синхронизации часов в точках А и В, неподвижных относительно друг друга, он предлагает использовать обмен между ними световыми сигналами. Необходимое для этого время прохождения светового сигнала тем больше, чем больше расстояние между точками А и В - время может служить мерой расстояния и наоборот.

Следует отметить, что Эйнштейн нигде в первой работе не утверждает, что скорость света в пустоте c - есть предельная, превышение которой невозможно. Он обсуждает этот вопрос позже, в 1907 г. ^{/17/}, используя закон сложения скоростей. Если в какой-либо системе координат возможно получить сигнал, распространяющийся со скоростью V , превышающей скорость света c , то, наблюдая этот сигнал в системе координат, убегающей от него со скоростью U , меньшей c , можно, как следует из теоремы сложения скоростей, получить отрицательное время прохождения сигнала. "Этот результат, - пишет Эйнштейн, - показывает, что мы вынуждены считать возможным механизм передачи сигнала, при использовании которого достигаемое действие предшествует причине. Хотя этот результат с чисто

* См. ^{/1/} стр. 7.

логической точки зрения и не содержит, по-моему, в себе никаких противоречий, он все же настолько противоречит характеру всего нашего опыта, что невозможность $V > c$ представляется в достаточной степени доказанной^{*}.

Подчеркнем, что в этом рассуждении очень существенно то, что V - именно скорость распространения сигнала.

Если теперь, через семьдесят лет после того, как это было сказано, задать вопрос: возможна ли скорость, превышающая скорость света, то ответ обычно бывает таков: невозможна скорость, большая скорости света c в пустоте, но вполне возможна скорость, превышающая скорость света в преломляющей среде. Именно этот случай, как известно, осуществляется в эффекте Вавилова-Черенкова.

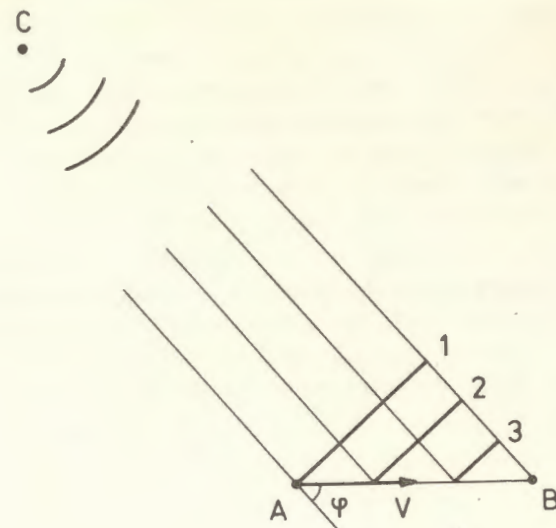
Такой ответ, по крайней мере, неполон. Стоит остановиться на этом вопросе подробнее.

*

В действительности возможны скорости, превышающие скорость света c . Так, вместо частицы, движущейся, например, из точки A в точку B , можно рассматривать световой импульс, бегущий вдоль прямой AB . Нетрудно убедиться, что при этом отпадают какие-либо ограничения в величине скорости. В самом деле, предположим, что в вакууме из некоторой точки C , удаленной от AB , испускается короткий световой импульс. В случае, показанном на рис. 1, он достигает сначала точки A /положение импульса 1/, а затем побегит от A к B со скоростью $V = \frac{c}{\cos \phi}$ /положения 2 и 3/. Таким образом, скорость его распространения больше c , и тем больше, чем ближе ϕ к $\frac{\pi}{2}$.

При $\phi = \frac{\pi}{2}$, т.е. при нормальном падении света, скорость V становится бесконечно большой - в A и B световой сигнал приходит одновременно. Казалось бы, можно с его помощью одновременно синхронизировать часы в обеих этих точках. При этом световой импульс, бегущий по плоскости от A к B , совершенно реален. В этом легко убедиться, поместив, например, на пути от A к B рассеиватели света. Попадание в них светового импульса будет сопровождаться излучением из этих точек световых вспышек. В этом случае нет, в сущности, различия с частицей, движущейся от A к B и излучающей свет.

^{*} См.^{1/} стр. 76.



$$V = \frac{c}{\cos \phi}$$

Рис. 1. Короткий световой импульс, испускаемый из удаленной точки C , достигнув точки A , бежит вдоль прямой AB со скоростью $V > c$.

Противоречит ли Эйнштейну то, что при этом скорость V больше скорости c ? Противоречит ли Эйнштейну то, что часы в A и в B , независимо от расстояния между ними, можно синхронизировать сколь угодно быстро и даже мгновенно? Прежде всего, легко убедиться, что здесь нет противоречия с теорией относительности, так как ею запрещена не скорость, большая c , а только скорость распространения сигнала, превышающая скорость света в пустоте. В данном же случае импульс, приходящий в B , никакой информации о точке A не несет, и он не может рассматриваться как сигнал, идущий из A . Что касается возможности синхронизации часов, то она также не противоречит Эйнштейну.

Вместе с тем V действительно имеет реальный смысл. Чтобы убедиться в этом, допустим, например, что отрезок AB движется со скоростью U вдоль своего направления, убегая

от источника света /рис. 2/. Тогда, в силу aberrации света, угол ϕ между направлением лучей и прямой АВ изменится и превратится в ϕ' , а V в V' . Острый угол ϕ' может при $U=U_1$ стать прямым /рис. 2b/, и тогда скорость V' делается бесконечной. При дальнейшем увеличении U до $U=U_2$, ϕ' превратится в тупой угол, и скорость V' изменит свой знак, так что световой импульс побежит от В к А /рис. 2c/. При этом легко убедиться, что трансформация V происходит в точном согласии с релятивистским законом сложения скорости V и U , что, разумеется, не случайно. Мы получаем в соответствии со сказанным те же следствия, которые получил Эйнштейн для V , большего c . Если бы попадание импульсов в А и В можно было рассматривать как сигнал, выходящий из

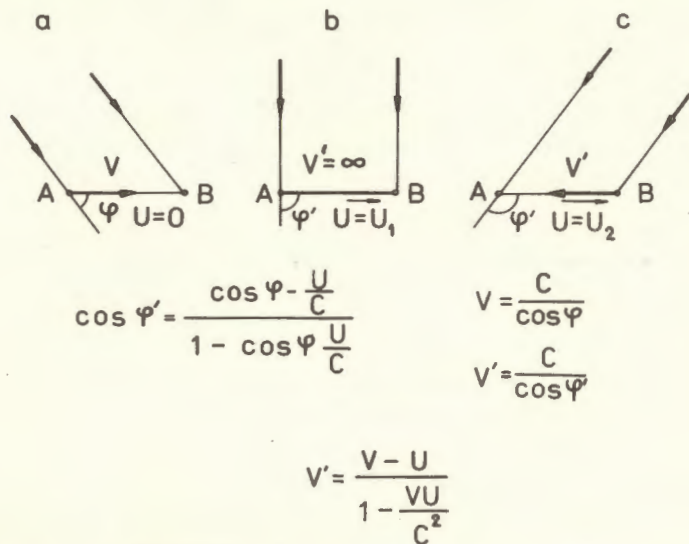


Рис. 2. В отличие от рис. 1, отрезок АВ движется со скоростью U /рис: b и c /. Тогда, в результате aberrации света угол ϕ превращается в ϕ' /см. на рисунке релятивистскую формулу, связывающую $\cos \phi$ с $\cos \phi'$ /. Углу ϕ' соответствует скорость распространения импульса вдоль прямой АВ, равная V' . При $U=U_1$ величина $V' = \infty$ /угол $\phi' = \frac{\pi}{2}$ /, а при $U=U_2$ величина V' отрицательна. Последовательность событий в этом случае меняется - импульс приходит в В раньше, чем в А. Легко убедиться, что V' связано с V и U релятивистской формулой сложения скоростей.

А /причина/, а приходящий в В как следствие, то изменение знака V' означало бы, что следствие предшествует причине - импульс в В возникает раньше импульса в А. Однако в данном случае скорость V , большая c , хотя и реальна, но не приводит к противоречию с законом причинности.

Рассмотрим другой пример, из которого также видно, что рассматриваемая скорость V имеет близкую аналогию со скоростью частицы^{26/}. Будем считать А границей раздела двух сред, плоскость которой перпендикулярна плоскости чертежа. Пусть преломляющая среда II с показателем преломления n_2 заполняет полупространство ниже границы АВ, тогда световой импульс из С, бегущий вдоль границы раздела, приведет к появлению преломлений волны в среде II, идущей под углом Θ к границе раздела /рис. 3/. При этом $\cos \Theta$ удовлетворяет такому же соотношению, как и характерный угол эффекта Вавилова-Черенкова для частицы со скоростью V /см. рис. 3/.

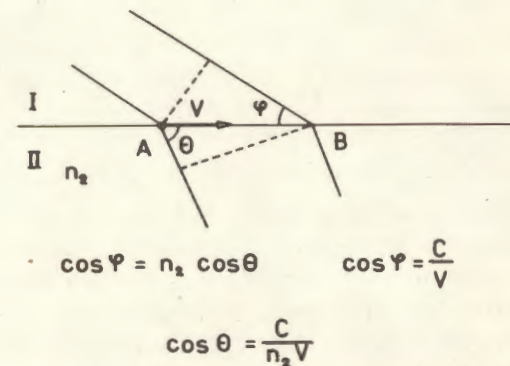


Рис. 3. Отрезок АВ лежит на плоской границе раздела вакуума I и среды II с показателем преломления n_2 . Световой импульс, приходящий на границу раздела, создает преломленную волну под углом Θ к поверхности. Нетрудно убедиться, что косинус Θ связан со скоростью V тем же соотношением, что и характерный угол в излучении Вавилова-Черенкова, а именно: $\cos \theta = \frac{c}{n_2 V}$.

Однако, если в эффекте Вавилова-Черенкова скорость всегда меньше c , то здесь она может быть любой. Круг вопросов, связанных со сверхсветовыми скоростями, привлек внимание и был

недавно детально обсужден^{/27,28/}. Из сказанного видно, насколько существенно утверждение Эйнштейна о том, что ограничения накладываются только на скорость распространения сигнала, которая не может превышать c .

В 1905 г. Эйнштейном был получен и еще один важнейший результат, в сущности, завершивший создание специальной теории относительности, а именно: установление закона пропорциональности величин энергии и массы^{'19'} - знаменитого соотношения $E = mc^2$. Эйнштейн рассматривает в связи с этим очень простой мысленный опыт, в котором впервые применяет к процессам излучения света законы сохранения энергии и импульса: покоящийся излучатель испускает в противоположные стороны две равные порции энергии. Очевидно, что свет уносит импульс, равный нулю, и излучатель остается покоящимся. В движущейся системе координат он будет иметь ту же скорость, какую имел бы излучатель, не испустивший света. При этом, однако, его кинетическая энергия должна быть иной, а это возможно, только если неодинаковы их массы. Из такого рассмотрения, использующего закон сохранения энергии, однозначно следовало, что энергия света E унесла с собой массу m такую, что $E = mc^2$.

Этому результату, полученному в 1905 году, Эйнштейн придает, несомненно, очень большое значение, и в 1906-1907 гг. он вновь посвящает ему статьи, чтобы обосновать предположение о том, что закон $E = mc^2$ ^{/18,20/} * является универсальным.

Следует отметить, что законы сохранения энергии и импульса Эйнштейн считал настолько фундаментальными, что вытекающее из них соотношение $E = mc^2$ для него было несомненным, хотя проверить его экспериментально в то время еще не представлялось возможным. Нельзя было ожидать, что менее чем через три десятилетия практическое применение этого закона станет необходимым для ядерной физики. Это выяснилось после того, как появилась возможность изучать процессы, происходящие с отдельными частицами вещества. В частности, были исследованы электромагнитные процессы, в которых вся масса частиц возникает за счет массы фотона. На

* См./1/стр. 38.

рис. 4 показан случай рождения пары из электрона и позитрона, возникающих при исчезновении частицы света - фотона с энергией $E = 2,6$ МэВ.

Для дальнейшего существенно, что законы сохранения энергии и импульса Эйнштейн применил в своей квантовой теории излучения. Он показал, что, в отличие от случая, когда применимы классические представления, согласно которым излучаемая волна обычно распространяется во все стороны, вылет кванта света всегда направлен.



Рис. 4. Фотография электрон-позитронной пары, возникшей под действием γ -лучей с энергией фотонов 2,6 МэВ /снимок в камере Вильсона, полученный Л.В.Грошевым и И.М.Франком/.

В замечательной работе 1916 г. "К квантовой теории излучения"^{/21/} курсивом выделена фраза: "Оказывается, что к непротиворечивой теории мы придем только в том случае, если все элементарные процессы будем считать полностью направленными"^{*}. Отсюда следует, что: "В элементарном процессе спонтанного излучения молекула получает импульс отдачи, величина которого равна $h\nu/c$, а направление определяется, согласно современному состоянию теории, лишь "случайностью"^{**}. Зная все это и пользуясь законами сохранения энергии и импульса, можно, в частности, из элементарного квантового рассмотрения получить и закон Допплера. Насколько я знаю, это было впервые сделано Шрёдингером в 1922 г.^{/29/}

В работах Эйнштейна 1916 г.^{/21,22/} впервые были введены и использованы для вывода формулы Планка коэффициенты вероятностей перехода:

1/ Спонтанного перехода A_m^n из состояния Z_m в энергетически более низкое Z_n , при котором излучается квант $h\omega$ /рис. 5a/.
2/ Индуцированного излучения, которое "... может вызывать с равным успехом как уменьшение энергии, так и приращение энергии"^{***/22/}.

В первом случае испускается индуцированный фотон, и вероятность перехода пропорциональна B_m^n /падающий фотон рождает еще один фотон $h\omega$ /, т.е. вылетают два фотона /рис. 5b/. Во втором случае фотон поглощается. Вероятность пропорциональна B_n^m /рис. 5b'/.
Существенно квантовыми Эйнштейн считает все три процесса уже потому, что переход происходит между двумя дискретными боровскими состояниями. Однако он не выделяет процесс индуцированного испускания фотона как чисто "квантовый", в отличие от того, как это обычно делается теперь. У него B_m^n и B_n^m равноправны. По этому поводу он пишет: "Если резонатор Планка находится в поле излучения, то энергия резонатора изменяется благодаря тому, что электромагнитное поле совершает над резонатором работу; эта работа может быть положительной или отрицательной, в зависимости от соотношения фаз резона-

^{*} См.^{/3/} стр. 394.

^{**} См.^{/3/} стр. 406.

^{***} См.^{/3/} стр. 390.

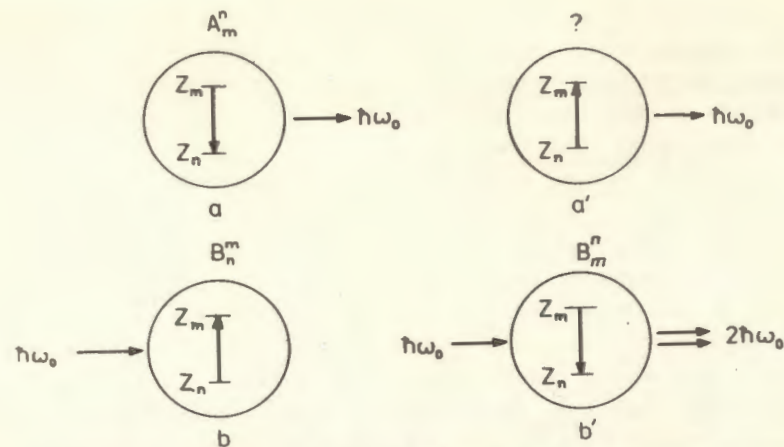


Рис. 5. Иллюстрация к эйнштейновским коэффициентам вероятностей переходов А и В. В кружках указаны соответствующие им квантовые переходы. Коэффициент A_n^m отсутствует /знак вопроса над кружком справа/.

тора и осциллирующего поля"^{** /21/}. К сожалению, об этой классической аналогии поглощения и индуцированного испускания теперь часто забывают^{**}.

Обращает на себя внимание то, что для спонтанного процесса есть только коэффициент A_m^n , а коэффициента A_n^m нет /см. рис. 5a'/. Различие с индуцированными процессами представляется очевидным - спонтанный процесс возможен только с выделением энергии, поскольку никакого внешнего воздействия, которое могло бы поставлять энергию, здесь нет. Однако это перестает быть очевидным, если представить себе, что источник излучения движется с очень большой скоростью в преломляющей среде, и его кинетическая энергия много больше, чем энергия испускаемого кванта. Закон сохранения энергии в этом случае не будет нарушаться, т.к. кинетической энергии достаточно и для испускания фотона и для перехода $Z_n \rightarrow Z_m$. Почему же и всегда ли невозможен для спонтанного процесса наряду

^{*} См.^{/3/} стр. 396.

^{**} Как отметил при обсуждении доклада Н.Г.Басов, это, вероятно, происходит потому, что в действительности аналогия не очень элементарна.

с коэффициентом A_m^{II} и коэффициент A_n^{III} ? Ответ состоит в том, что кроме закона сохранения энергии должен быть удовлетворен и закон сохранения импульса. Не случайно Эйнштейн многократно и настойчиво подчеркивает важность для процессов излучения обоих этих законов.

Прежде всего, если применить совместно оба эти закона к движущейся частице, то легко убедиться, что при равномерном и прямолинейном движении заряда в вакууме со скоростью, меньшей скорости света, удовлетворить их одновременно нельзя. В соответствии с законами электродинамики при таком движении электрический заряд в самом деле не излучает света*. Иное положение имеет место для заряда, движущегося с достаточно большой скоростью в среде. Скорость излучателя здесь может быть больше и фазовой и групповой скорости света для какой-либо области частот. Процесс спонтанного излучения становится возможным^{/33/} и в самом деле появляется хорошо известное всем излучение Вавилова-Черенкова. Частица, излучая свет, теряет свою кинетическую энергию. Действительно, в этом случае из простых классических соображений следует, что электромагнитное поле волны, действующее на частицу, таково, что стремится ее затормозить^{/30/}. То же самое должно было бы быть и для частицы, движущейся в вакууме со скоростью, превышающей c , как впервые показал А.Зоммерфельд еще в 1904 г.^{/31,32/}

Если же излучатель не имеет заряда, но обладает собственной частотой и движется в преломляющей среде, то при определенных условиях возникает так называемый аномальный эффект Доплера. В этом случае спонтанный переход с возбуждением, определяемый коэффициентом A_m^{III} , действительно становится возможным, и излучатель света также теряет кинетическую энергию.

*

К числу основных вопросов, рассмотренных в первой работе по теории относительности^{/5/}, относится и эффект Доплера. Эйнштейн считал эту проблему фундаментальной. Много позже,

* Чтобы убедиться в этом, достаточно перейти в систему координат, в которой частица покоится /такая система координат равноправна с исходной/.

в 1916 г., в статье "К квантовой теории излучения"^{/21/} он пишет: "...какую бы форму ни принимала теория электромагнитных процессов, принцип Доплера и закон абберации во всяком случае сохраняются...".

Если источник света движется в среде, заполненной веществом с показателем преломления $n(\omega)$, отличным от 1, то закон Доплера легко получить по аналогии со случаем вакуума^{/17/} из простых волновых соображений. Для релятивистской скорости закон Доплера имеет вид, представленный формулой на рис. 6а^{/26/}. Она соответствует случаю, когда движется источник света, имеющий собственную частоту ω_0 , а среда покоится. При этом θ - угол между лучом света и скоростью частицы, измеряемый в неподвижной системе координат, связанной со

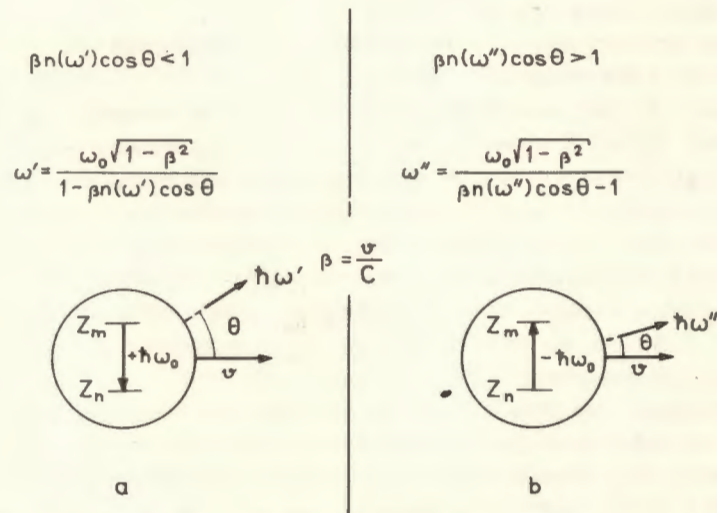


Рис. 6. Формулы Доплера для среды /источник света движется, а среда покоится/. Нормальный эффект Доплера слева, а аномальный - справа. Внизу показаны соответствующие возникновению нормальных и аномальных частот квантовые переходы.

* См. ^{/3/} стр. 402.

средой. Отличие этой формулы от случая вакуума лишь в том, что косинус в знаменателе дополнительно умножен на величину показателя преломления.

При этом в уравнение Допплера входит показатель преломления не для собственной частоты излучателя ω_0 , а для доплеровской ω' . Это обстоятельство в ряде случаев может приводить к существенным особенностям. Возможно, например, расщепление доплеровской частоты на несколько компонент - так называемый сложный эффект Допплера^{/26/}. Так как доплеровская частота ω' -величина существенно положительная, то необходимо выполнение неравенства *рис. 6а*. Спектр доплеровских частот, определяемых уравнением *рис. 6а*, называют нормальным. В нижней части *рис. 6а* схематически показан механизм возникновения нормальных доплеровских частот. В излучателе, как и обычно, происходит спонтанный переход с уменьшением внутренней энергии на величину $\hbar\omega_0$, и при этом возникает фотон с энергией $\hbar\omega'$.

Для дальнейшего существенно, что уравнение *рис. 6а* не является единственным. В плотной среде с $n(\omega)$, большим единицы, и для релятивистской частицы возможен т.н. аномальный эффект Допплера, определяемый уравнением *рис. 6б*^{/26/}. Очевидно, что для того, чтобы в знаменателе уравнения *рис. 6б* стояла положительная величина, также необходимо выполнение неравенства, но уже обратного по сравнению с *рис. 6а*. Для появления аномального и сложного эффекта Допплера существенную роль играет не только фазовая, но и групповая скорость света. При этом излучатель не может полностью обгонять излучаемый им свет^{/24,25/}.

Нетрудно убедиться, что доплеровская частота при аномальном эффекте ведет себя совсем необычным образом. В самом деле, мы привыкли, что движущийся источник света вперед излучает свет наиболее высоких частот /синее смещение в спектре/, а назад - наиболее низких /красное смещение/.

Для аномального эффекта Допплера эта зависимость иная. Так, в области спектра, в которой показатель преломления мало меняется, доплеровская частота с увеличением угла Θ не уменьшается, а, наоборот, растет. Легко убедиться, что аномальный эффект Допплера, в отличие от нормального, возможен только для острых углов Θ , и для каждой ω_0 , для которой

он возможен, имеется пороговая скорость, необходимая для его возникновения. Забегая вперед, скажу, что при аномальном эффекте Допплера происходит спонтанное возбуждение излучателя на величину $\hbar\omega_0$, с испусканием фотона $\hbar\omega''$, как это показано на *рис. 6б*.

Мы привыкли к тому, что если имеется излучающий свет осциллятор, то создаваемое им электромагнитное поле должно действовать на него так, чтобы колебания затухали. Это естественно, так как излучение света уносит энергию, и, следовательно, по закону сохранения энергии должно происходить уменьшение энергии колебаний, т.е. их затухание. Однако заранее не очевидно, какова будет реакция поля на излучатель, если он движется быстрее, чем излучаемая им световая волна. Оказывается, это приведет к тому, что изменится и реакция поля на излучатель и возникнет сила, стремящаяся раскачивать его излучаемой им волной^{/36/}. Нетрудно убедиться в том, что здесь не возникает никаких противоречий с законом сохранения энергии. В самом деле, поле излучения при этом тормозит движущуюся частицу и, следовательно, ее кинетическая энергия превращается как в энергию колебаний, так и в энергию излучения.

Природу эффекта Допплера легче всего выяснить, применив законы сохранения энергии и импульса к процессу испускания фотона движущимся в среде источником света. Такое рассмотрение, как уже отмечалось, - это элементарное следствие работ Эйнштейна. Если при квантовом рассмотрении допустить, что энергия излучаемого фотона мала по сравнению с кинетической энергией движения /что соответствует допущению, что движение происходит с постоянной скоростью/, то, как и должно быть, получаются классические формулы Допплера. Для источника света, движущегося в преломляющей среде, не вполне элементарным является только вопрос о том, какой импульс следует приписать излучаемому им фотону. Оказалось, что для того, чтобы получить правильную величину импульса фотона в среде, следует величину импульса фотона в вакууме - $\frac{\hbar\omega}{c}$ умножить на показатель преломления среды^{/33,34/}.

Если излучатель света, испуская фотон, переходит из одного энергетического состояния в другое, то, в согласии с Эйнштейном, следует принимать во внимание, что происходит изменение

массы покоя, меняющее при заданной скорости и величину кинетической энергии. Из результатов рассмотрения /^{25,35}/ однозначно получается, что нормальный эффект Доплера /формула рис. 6а/ соответствует обычному для излучения процессу - спонтанному переходу из более высокого энергетического состояния в более низкое, отличающееся по энергии на величину $\hbar\omega_0$. Что касается аномального эффекта Доплера, то спонтанное излучение фотона $\hbar\omega''$ в самом деле сопровождается само-возбуждением, т.е. переходом в более высокое энергетическое состояние, отстоящее от исходного на величину $\hbar\omega_0$ /³⁵/ . Мы видим, таким образом, что в спонтанном излучении может быть существен не только эйнштейновский коэффициент A_m^n , но также и коэффициент A_n^m . Однако это происходит лишь тогда, когда скорость излучателя превосходит фазовую скорость света для излучаемой частоты. Следует иметь в виду, что хотя получаемые таким образом квантовые формулы для эффекта Доплера в среде не отличаются от классических /см. рис. 6/, но их интерпретация при квантовом подходе иная. При классическом рассмотрении движущийся осциллятор излучает одновременно и нормальную и аномальные частоты /если они возможны/. Реакция поля для нормальных частот стремится вызвать затухание колебаний осциллятора, а излучение аномальных частот - их раскачку /³⁶/ . С квантовой точки зрения эти процессы не одновременны, а происходят последовательно: например происходит спонтанное возбуждение излучателя с излучением аномальной частоты, а затем спонтанный переход в нижнее состояние с излучением нормальной частоты /рис. 7/ и т.д. Источником энергии является кинетическая энергия движения, которая должна при этом уменьшаться /³⁰/ .

К сказанному следует добавить несколько слов об эйнштейновских коэффициентах B_m^n и B_n^m для вынужденных процессов. При том же угле падения процесс поглощения света должен вызывать обратный по отношению к испусканию переход. Отсюда следует, что мы получим разный результат, в зависимости от того, воздействует ли на движущийся излучатель фотон $\hbar\omega'$, соответствующий нормальному процессу, или фотон $\hbar\omega''$, соответствующий аномальному процессу. В первом случае /рис. 8/ все происходит так, как это указано Эйнштейном. При поглощении фотона происходит возбуждение, а при индуцированном

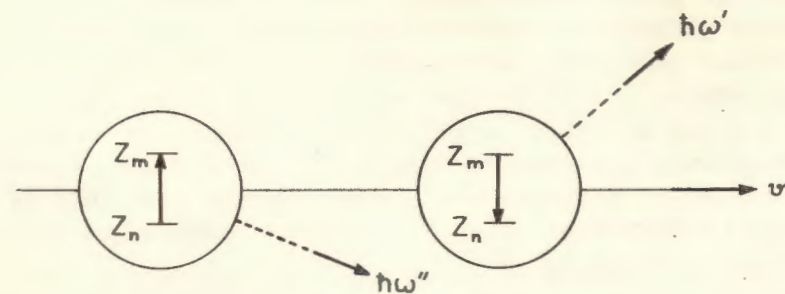


Рис. 7. Спонтанное излучение света в случае, когда возможен аномальный эффект Доплера. Испускание фотонов, соответствующих аномальному эффекту Доплера - $\hbar\omega''$ и нормальному - $\hbar\omega'$, следуют друг за другом.

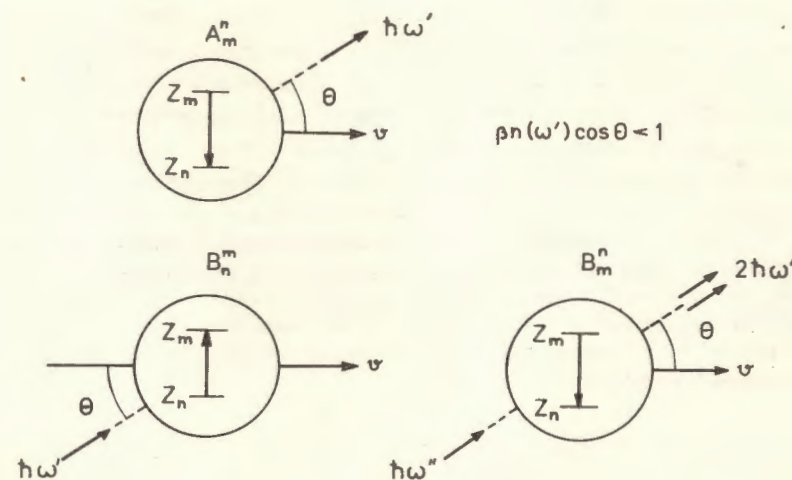


Рис. 8. Роль эйнштейновских коэффициентов А и В в случае нормального эффекта Доплера. Все происходит так, как указано Эйнштейном /рис. 5/.

испускании фотона имеет место переход в низшее состояние. В случае аномального процесса, как мы видели при спонтанном излучении, происходит возбуждение излучателя /рис. 9/ и, следовательно, при поглощении фотона $h\omega''$ должен происходить переход из верхнего состояния в нижнее. Что касается индуцированного испускания фотона, то оно, наоборот, должно сопровождаться возбуждением. Таким образом, роль эйнштейновских коэффициентов B_n^n и B_n^m взаимно меняется местами, как это показано на рис. 9.

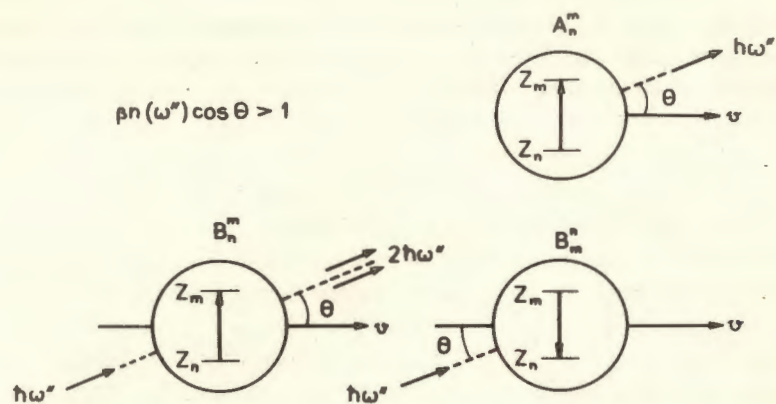


Рис. 9. Роль эйнштейновских коэффициентов А и В в случае аномального эффекта Доплера. В отличие от привычного, спонтанное излучение определяется коэффициентом A_n^m , что касается коэффициентов В, то их роли меняются местами. Коэффициенту B_n^n соответствует поглощение, а B_n^m - вынужденное испускание света /ср. с рис. 5/.

Можно ожидать и другие особенности в свойствах источников света, движущихся в среде. Так, при рассеянии света заряженной частицей, движущейся в среде, кроме рассеянного фотона $h\omega_2$, возможно появление и индуцированного фотона. При этом падающий фотон $h\omega_1$ превращается в два фотона^{/37/} /рис. 10/. Этому индуцированному процессу соответствует спонтанный, при котором одновременно испускаются два фотона $h\omega_1$ и $h\omega_2$. Квантовое рассмотрение показывает, что такое

излучение Вавилова-Черенкова с испусканием сразу двух фотонов возможно^{/37/}, хотя экспериментально пока не изучено.



Рис. 10. Аномальное рассеяние света на частице, движущейся в преломляющей среде. Падающий фотон $h\omega_1$ вызывает индуцированный фотон и, кроме того, возникает рассеянный фотон $h\omega_2$. Соответствующий этому спонтанный процесс - одновременное испускание фотонов $h\omega_1$ и $h\omega_2$ /двухфотонный эффект Вавилова-Черенкова/. В обоих случаях необходимо, чтобы было $\beta n(\omega_1) \cos \theta_1 > 1$ и $\beta n(\omega_2) \cos \theta_2 > 1$ или наоборот.

Возвращаясь к проблеме возможной скорости движения, мы можем сказать следующее: невозможно, чтобы обычная частица обладала скоростью, большей скорости света в пустоте, однако в среде возможно движение со скоростью, большей фазовой скорости волн. Тем не менее, природа не полностью снимает свой запрет. В самом деле, на примере эффекта Вавилова-Черенкова и аномального эффекта Доплера мы видим, что при этом всегда возникает спонтанное излучение. Поскольку на излучение затрачивается кинетическая энергия, то, следовательно, при сверхсветовой скорости движение перестает быть свободным, оно тормозится^{/25,30/}.

ЛИТЕРАТУРА

1. Альберт Эйнштейн. Собрание научных трудов, т. I. Работы по теории относительности, 1905-1920. "Наука", М., 1965.
2. То же, т. 2. Работы по теории относительности 1921-1955. "Наука", М., 1966.
3. То же, т. 3. Работы по кинетической теории, теории излучения и основам квантовой механики 1901-1955. "Наука", М., 1966.
4. То же, т. 4. Статьи, рецензии, письма "Эволюция физики", "Наука", М., 1967.

5. Einstein A. *Ann.Phys.*, 1905, 17, p.891-921, /см. 1, стр. 7-35/.
6. Einstein A. *Ann.Phys.*, 1905, 17, p.132-148, /см. 3, стр. 92-107/.
7. Einstein A. *Ideas and Opinions*. N.Y. Grown Publishers Inc. 1954. /см. 1, стр. 677-681/.
8. Эйнштейн А. *Природа света. Новые идеи в физике. Сборник*, 1912, с.5. *Phys.ZS.* 1909, 10, p.817-825, /см. 3, стр. 181-195/.
9. Эйнштейн А. *Новые идеи в физике. Сборник*, 1914, 3. *Arch.Sci.Phys.Natur.* ser. 4, 1910, p.5-28, 125-144, /см. 1, стр. 138-164/.
10. Альберт Эйнштейн. *Геометрия и опыт. Научное книгоиздательство. Петроград*, 1922. *Geometrie und Erfahrung*, Verlag von Julius Springer, Berlin, 1921, /см. 2, стр. 83-94/.
11. Альберт Эйнштейн. *О физической природе пространства. Книгоиздательство "Слово"*, 1922.
12. Albert Einstein *Ather und Relativitätstheorie*, Verlag von Julius Springer, Berlin 1920, / см. 1, стр. 682-689/.
13. Альберт Эйнштейн. *Теория относительности /общедоступное изложение/. Книгоиздательство "Слово"*, 1921. *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)* 1917 /см. 1, стр. 530-600/.
14. Einstein A. *Z.Phys.*, 1922, 11, p.326, /см. 2, стр.118/.
15. Einstein A. *Z.Phys.*, 1923, 16, p.228, /см. 2, стр. 119/.
16. Einstein A. *Sitzungsber. Preuss. Akad.Wiss*, 1917, 1, p.142-152, /см. 1, стр.601-612/.
17. Einstein A. *Jahrb. d.Radioaktivität u. Elektronik* 1907, 4, p.411-462, /см. 1, стр.65-115/.
18. Einstein A. *Ann.Phys.*, 1907, 23, p.371-384, /см. 1, стр. 53-64/.
19. Einstein A. *Ann.Phys.*, 1905, 18, p.639-641, /см. 1, стр.36-38/.
20. Einstein A. *Ann.Phys.*, 1906, 20, p.627-633, /см. 1, стр. 39-44/.
21. Einstein A. *Mitt.Phys.Ges (Zürich)* 1916, Nr.18, p.47-62, /см.3, стр.393-406/.
22. Einstein A. *Verhandl. Dtsch.Phys.Ges.*, 1916, 18, p.318-323, /см. 3, стр. 386-392/.
23. Friedmann A. *Z.Phys.*, 1922, 10, p.377-386.
24. Франк И.М. *ЖЭТФ*, 1959, 36, с.823.
25. Frank I.M. *Optics of Light Sources Moving in Refractive Media. /Нобелевская лекция, см., например, Science, 1960, v.131, p.702-712. или УФН, 1959, 68, с.397/.*
26. Франк И.М. *Изв. АН СССР, сер. физ.*, 1942, VI, с.3-31.
27. Болотовский Б.М., Гинзбург В.Л. *УФН*, 1972, 106, с.577.
28. Гинзбург В.Л. *Теоретическая физика и астрофизика /дополнительные главы/. "Наука"*, М., 1975.

29. Schrödinger E. *Phys.Zeitschr.* 1922, 23, p.301.
30. Франк И.М. *УФН*, 1946, 30, с.149-182.
31. Sommerfeld A. *Götting. Nachricht.* 1904, 99, p.368; 1905, 205.
32. Ig. Tamm. *Journ.of Phys., USSR*, 1939, 1, p.439.
33. Гинзбург В.Л. *ЖЭТФ*, 1940, 10, с.584.
34. Франк И.М. *ОИЯИ, Р4-9589*, Дубна, 1976. *Rev.Roum.Phys.*, 1978, 23, p.715-722.
35. Гинзбург В.Л., Франк И.М. *ДАН*, 1947, 56, с.583.
36. Гинзбург В.Л., Эйдман В.Я. *ЖЭТФ*, 1959, 36, с.1823.
37. Франк И.М. *ЯФ*, 1968, 7, с.1100.

Рукопись поступила в издательский отдел
27 апреля 1979 года.