

В.Г. Веселаго

Мой путь к отрицательному преломлению

Детство. Днепр. Волга. Москва

Я родился 13 июня 1929 года. В моей метрике место рождения было обозначено как деревня Кичкасс Запорожской области, это тогда была Украинская республика в составе СССР, а сейчас это просто Украина. Однако на современной карте Украины вы этой деревни не найдете. Дело в том, что мой отец работал тогда инженером на строительстве Днепровской гидроэлектростанции, а деревня Кичкасс была затоплена при наполнении водохранилища Днепровской ГЭС. Так что я сейчас не могу посетить свою «историческую родину», разве только можно на лодке или, может быть, на теплоходе проплыть над затопленной деревней. К своему сожалению, я в зрелом возрасте ни разу не был в городе Запорожье, вблизи которого находится плотина Днепровской ГЭС. После окончания строительства в 1932 году мы уехали оттуда, и я совершенно не помню Днепр и гидроэлектростанцию на нем. За строительство Днепрогэса отец получил орден Ленина, трехкомнатную квартиру в Москве (обе эти награды по тем временам были очень весомы) и престижное назначение на должность начальника строительства Средне-Волжской гидроэлектростанции. Отец очень гордился тем, что ему доверили строительство гидроэлектростанции на Волге, и надеялся, что он сможет провести это строительство от начала до конца.

Строительство гидроэлектростанции планировалось около города Ярославля, чуть выше известного Толгского монастыря, который в это время уже был закрыт, а в его храмах и монастырских кельях были расположены различные службы управления строительством и жилье для инженеров, занятых на строительстве. Наша семья – отец Георгий Сергеевич, мать Елена Борисовна,

мой старший брат Андрей и я – занимали две комнаты в так называемом “красном доме”, это было здание бывшей монастырской гостиницы. В этом же здании расположилась семья инженера Вячеслава Алексеевича Захарьевского, который был женат на Марии Борисовне, сестре моей матери. Вячеслав Алексеевич был другом моего отца, и фактически мы и Захарьевские составляли одну семью

Я помню себя именно начиная с жизни на Волге. Мощная река, красивые и, по тем временам, большие пароходы, льдины, с грохотом наезжавшие во время ледохода друг а друга, все это оставило в моей памяти впечатление, незабываемое до сих пор. Эта спокойная жизнь оказалась совершенно неожиданно для меня прерванной в августе 1935 года, когда отец пришел с работы и заявил, что строительство гидростанции прекращается и мы переезжаем в Москву. Услышав это, я, в знак протеста, сел на пол и заплакал. Тем не менее примерно через неделю мы всем семейством погрузились в персональную машину отца и поехали в Москву. Отец и его шофер вели машину периодически меняясь за рулем, а на заднем сиденье была мать, Андрей и я. Выехали из Толги утром, а вечером, уже в темноте, приехали в Москву и вошли в ту самую «премиальную» квартиру, которую отец получил за Днепрострой.

Здесь уместно сказать о причинах, которые заставили прекратить строительство Ярославской гидростанции, которое к этому моменту было в самом разгаре. Причиной был тот факт, что в процесс строительства вмешалось всемогущее ведомство НКВД. В этом ведомстве содержались многие тысячи заключенных, по большей части ни в чем не повинных людей, и власти стремились использовать бесплатный труд этих заключенных на строительстве тех или иных объектов. К этому времени был уже накоплен опыт использования труда заключенных на строительстве Беломорско-Балтийского канала, и следующим шагом в этом направлении было избрано перекрытие Волги у Рыбинска, выше планировавшейся Ярославской гидростанции, с образованием гигантского искусственного «Рыбинского

моря», под водой которого оказались затопленными несколько городов и деревень, и громадные площади сельскохозяйственных угодий.

Формально, в смысле карьеры, отец не проиграл от перемещения в Москву, где он был назначен на престижную должность заместителя начальника и главного инженера треста «Главгидроэнергопроект». Эта организация отвечала за проектирование и строительство гидроэлектростанций во всем Советском Союзе. Приемник треста «Главгидроэнергопроект» существует до сих пор, он размещен в высокой башне, находящейся в Москве на развилке Ленинградского и Волоколамского шоссе.

Переехав в Москву, отец целиком погрузился в новую работу, но неоднократно говорил, что он очень жалеет, что ему не удалось построить гидроэлектростанцию на Волге от начала и до конца. Вся наша жизнь после переезда в Москву было вполне благополучна, и так было до сентября 1937 года, когда в нашей семье произошла трагедия – отец погиб в железнодорожной катастрофе. Он возвращался поездом с Дальнего Востока, где был по служебным делам, оценивая гидроэнергетические ресурсы советского Дальнего Востока, и ночью его курьерский поезд въехал в хвост предыдущего товарного состава. Отец был единственным погибшим пассажиром, кроме него погиб один из членов паровозной бригады.

Через год после гибели отца я пошел в школу, причем сразу во второй класс так как мог свободно писать и читать. Мне очень повезло – я попал в первоклассную школу, в которой учителя явно выделялись, но особо выделялся ее директор, Федор Федорович Рошин. Этому человеку я был впоследствии многим обязан.

В школе я учился средне, стараясь не вызывать нареканий учителей и не выделяться ни в хорошую, ни в плохую сторону.

Война. «Что такое радио?»

Так прошло почти четыре года, пока все резко не изменилось с началом войны в 1941 году. Когда немецкие войска стали приближаться к Москве,

началась массовая эвакуация жителей и промышленных предприятий на восток. Это коснулось и меня с моей матерью, и ее сестры с мужем, Вячеславом Алексеевичем Захарьевским. Мы все вместе были эвакуированы в Ташкент, откуда вернулись только весной 1944 года. При этом у меня был трехмесячный пропуск занятий в школе, до годовых экзаменов оставалось три недели, и в нескольких ближайших к нашему дому школах мне отказывали в приеме, говоря «пусть остается на второй год». Положение осложнялось тем, что та школа, в которой я учился до войны, в военные годы закрылась. Однако моя мать сумела найти бывшего директора этой школы, Ф.Ф.Рощина. Оказалось, что он стал директором элитарной школы, расположенной в центре Москвы, в которой учились дети высших московских чиновников. Ф.Ф. сразу же вспомнил меня, более того он вспомнил и моего брата Андрея, который учился до войны в той же школе что и я, блестяще ее окончил, а в 1943 году, будучи лейтенантом Красной Армии умер в госпитале от ран, полученных на фронте. Решение Ф.Ф. было четким и быстрым

-пусть идет в класс и готовится к экзаменам. А там посмотрим.

Экзамены я сдал на «4» и «5», и был успешно переведен в следующий класс.

И тут произошло событие, которое по сути дела определило всю мою дальнейшую жизнь. В начале следующего учебного года я заболел, сейчас уже не помню чем именно, и был, в соответствии с врачебными рекомендациями тех лет, уложен в постель. Лежать было крайне скучно и я продолжил свое любимое занятие - рыться в книгах довольно обширной домашней библиотеки, оставшейся после смерти отца. Среди прочих технических и художественных книг мне попала книжка средней толщины под названием «Что такое радио?». Автором книги был обозначен некий С.Кин. Книга оказалась вполне понятной, и в ней подробно излагалось, как сделать простейший детекторный радиоприемник. Я сразу же подумал

-неужели я не смогу собрать такой радиоприемник?

Вечером я попросил маму купить в магазине несколько простых деталей, собрал из них приемник, следуя рекомендациям С.Кина, и на следующий день уже слушал какой-то концерт, передаваемый московской радиостанцией. Так началась моя радиолюбительская активность, продолжавшаяся три года, вплоть до окончания школы.

Перед окончанием школы я начал задумываться о поступлении в институт, причем я был твердо настроен на поступление в институт радиотехнического профиля, и уже начал изучать информацию об московских институтах, в которых можно было бы получить радиотехническое образование. Надо сказать, что я предполагал стать радиоинженером на каком-либо заводе, и совершенно не мыслил себя научным работником, более того, я наверное и не смог бы сказать, что такое «научный работник». И вот в это время произошло событие, которое снова по сути дела определило всю мою дальнейшую жизнь.

Один из моих одноклассников показал мне небольшой рекламный буклет, в котором сообщалось об организации в Московском университете нового, физико-технического факультета. Этот новый факультет должен был готовить специалистов для научных учреждений по нескольким специальностям, в том числе по радиофизике. В новом факультете для меня было еще одно очень притягательное обстоятельство. Дело в том, что приемные экзамены в нем начинались 1-го июля, а не 1-го августа, как это было тогда во всех наших высших учебных заведениях. Этот нестандартный срок экзаменов означал, что в случае неудачи со сдачей вступительных экзаменов и отказа в приеме я мог с 1-го августа начать сдавать экзамены в какой-нибудь другой институт. Именно эта возможность иметь запасной вариант была основной причиной, которая заставила меня подать документы для поступления на этот новый факультет. Всего предстояло сдать 9 экзаменов

Алгебра (письменно и устно)

Геометрия с тригонометрией (письменно и устно)

Физика (письменно и устно)

Химия

Немецкий язык

Сочинение по русскому языку и литературе.

Успешно сдавшим все экзамены предстояло пройти собеседование перед специальной комиссией.

1-го июля я пришел сдавать письменную алгебру, и здесь меня ждала крупная неудача. Я получил 2. Причина неудачи была проста – я растерялся в незнакомой обстановке, и, выражаясь современным языком, был плохо подготовлен психологически. Экзамен проходил на физическом факультете университета в так называемой «Большой физической аудитории». Нас рассадили поодиночке в громадном зале, уходившем амфитеатром куда-то вверх. Я чувствовал себя песчинкой в необъятном просторе, растерялся и не мог собрать свои мысли для решения задач. В результате – провал, хотя по существу я был неплохо подготовлен.

На следующий день после провала я пришел в приемную комиссию и попросил у какого-то ее сотрудника вернуть мне мои документы, которые я намеревался подать в какой-нибудь другой институт. В ответ на мою просьбу я услышал:

-Послушай, тебе все равно нечего делать, приходи послезавтра на устный экзамен, а там посмотрим, как с тобой быть.

Я конечно пришел на этот экзамен по устной алгебре и получил 5. Мне тут же предложили в общем порядке сдавать все остальные экзамены, и я на них получил 6 пятерок и только одну четверку по немецкому языку. Причина успеха была тоже чисто психологическая. Я считал, что мне нечего терять и вел себя совершенно раскованно. Особенно я разошелся на экзамене по химии. Не помню уже, что именно я говорил, но экзаменатор сказал мне

-Вы отчаянно смелый человек. Такие люди нам нужны. Я буду говорить об Вас особо.

После серии экзаменов состоялось собеседование.

Я предстал перед комиссией из каких-то очень солидных людей, и один из них спросил

-Скажите, почему Вы идете именно на специальность «радиофизика» (на факультете было еще 5 других специальностей)

-потому что я 3 года занимался радиолюбительством и это меня привлекает больше всего.

-Скажите, какой именно радиоприемник вы построили?

-Четырехламповый всеволновый супергетеродин.

-А какой тип лампы вы применили в звуковом усилителе?

Я сходу назвал тип лампы

- а почему вы выбрали именно эту лампу?

Я наизусть назвал все ее параметры и показал, что она была наиболее подходящей.

-Спасибо. Вы можете идти.

Мне показалось, что и я и мой экзаменатор получали удовольствие от этой беседы. На следующий день я нашел свою фамилию в списке принятых.

Физтех.Крым.ФИАН

Физико-технический факультет МГУ (ФТФ МГУ) был предшественником современного Московского Физико-Технического Института (МФТИ). На факультете была принята крайне интенсивная методика подготовки студентов, которую не все выдерживали. Лекции на ФТФ читали такие ученые как Капица и Ландау. Большинство преподавателей имели постоянную работу в академических институтах, там же мы, студенты, проходили практику и стажировку и тем самым приобщались к самой современной науке того времени. Интересно, что при сдаче экзамена по экспериментальной физике я получил у П.Л.Капицы 5, а на теоретической физике у Л.Д.Ландау -2, и после пересдавал этот предмет Е.М.Лифшицу

снова с оценкой 2, и только при повторной пересдаче у В.Б. Берестецкого я получил 4.

После окончания 2-го курса мне и нескольким другим студентам предложили поехать на летнюю практику в Крым, с тем чтобы поработать на Крымской радиоастрономической станции Физического института им. П.Н.Лебедева. Естественно, я с радостью согласился и провел это лето в Крыму, работая по сути дела радиотехником, используя свои знания, полученные еще во время занятия радиолобительством. Такая летняя практика в Крыму продолжалась и после 3-го и 4-го курсов. Во главе крымской экспедиции ФИАН тогда стоял известный физик Семен Эммануилович Хайкин. Общение с этим настоящим ученым и прекрасным человеком дало мне очень много. Интересно заметить, что именно С.Э.Хайкин был скрыт под псевдонимом «С.Кин» в качестве автора книги «Что такое радио ?» с которой началось мое знакомство с радиотехникой.

После лета, проведенного в крымской экспедиции ФИАН, мне захотелось продолжить работу в ФИАНе, и зимой 1949-1950 года я позвонил в ФИАН профессору Сергею Михайловичу Рытову с просьбой дать мне возможность поработать в ФИАНе во время студенческих зимних каникул. Профессор Рытов был официальным руководителем нашей группы на физтехе и он сразу же дал согласие на мою просьбу, предложив придти к нему в ФИАН через пару дней. Пока прошло это время, за мной увязалось несколько моих однокурсников, и в результате мы все пришли к Рытову, и стояли в его кабинете, ожидая своей судьбы.

Сам С.М.Рытов был известным физиком-теоретиком и поэтому его первый вопрос ко всем нам был

-Кто хочет заниматься теорией?

Таких среди нас не оказалось. Рытов сразу стал грустным и сказал

-Тогда придется позвать Сашу!

Он вышел в соседнюю комнату и вернулся с Александром Михайловичем Прохоровым, который был нам хорошо известен, так как он вел у нас на

физтехе лабораторные работы, которые мы называли «паяльный практикум». Рытов объяснил Прохорову ситуацию, и Прохоров, не раздумывая, ткнул в меня пальцем и сказал:

- Этого я беру себе!

Сразу раздались голоса

-А как же мы?

-Не волнуйтесь, сейчас всех устроим - успокоил С.М.Рытов

И действительно, были созваны другие сотрудники и все мы получили своих руководителей. Так я стал студентом практикантом лаборатории колебаний ФИАН. Тот факт, что Прохоров выбрал себе именно меня объяснялся просто – он заметил меня еще во время занятий на «паяльном практикуме», где я (не обвиняйте меня в нескромности) безусловно выделялся своей радиотехнической, точнее радиолубительской подготовкой.

В это же время С.Э.Хайкин предложил мне работать у него не только в Крыму летом, но и в его радиоастрономической лаборатории зимой. Подумав немного я отказался. Радиоастрономия как наука мне казалась тогда оторванной от реальности и скучной. Но после некоторых переговоров с Хайкиным и Прохоровым было решено, что летом я буду работать как радиотехник в Крыму у Хайкина, а зимой как студент-практикант в Москве у Прохорова.

В это время группа Прохорова начинала работы по радиоспектроскопии газов, и мной руководили, кроме А.М.Прохорова его близкий сотрудник Марк Ефремович Жаботинский и аспирантка Наталия Александровна Ирисова. Я принимал активное участие в изготовлении первых радиоспектроскопов сантиметрового диапазона, с помощью которых изучались спектры ряда газов, прежде всего аммиака. В дальнейшем именно на аммиаке начал работать первый квантовый генератор, за создание которого А.М.Прохоров, Н.Г.Басов и Ч.Таунс получили Нобелевскую премию.

Магнитные полупроводники.

Отрицательный коэффициент преломления

После окончания университета я естественным образом был принят на работу в ФИАН, в лабораторию Прохорова и работал под его руководством до его смерти в 2002 году. Тематика моих исследований была самой разнообразной. Я менял эту тематику примерно каждые 5-7 лет, и, в частности, начиная с 1960 года был занят исследованиями по получению и использованию сильных постоянных магнитных полей. Магнитная тематика привела меня к исследованию так называемых магнитных полупроводников. Эти вещества, являющиеся в некотором смысле «гибридом» магнетиков и полупроводников, обладали рядом необычных свойств, в частности мы надеялись получить с их помощью большое замедление скорости электромагнитных волн. Как известно, эта скорость может быть определена через коэффициент преломления n , который, в свою очередь, зависит от величин электрической и магнитной восприимчивостей ϵ и μ

$$n = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (1.1)$$

Я надеялся, что в магнитном полупроводнике можно будет за счет независимого увеличения величин ϵ и μ получить существенное увеличение n , и, тем самым, в соответствии с соотношением

$$v = c / n \quad (1.2)$$

где c - скорость света в вакууме, малую скорость волны v в веществе

Однако мои предположения натолкнулись на невозможность получить на какой-либо частоте одновременно высокие значения ϵ и μ . Более того, часто одна из величин ϵ или μ оказывалась отрицательной, что соответствовало мнимым значениям n , и, приводило тем самым, к невозможности распространения в таком случае волны сквозь вещество.

И в этот момент я, глядя на формулу (1.1), написанную на каком-то клочке бумаги, вдруг подумал «А что будет, если в веществе обе величины ϵ и μ

будут отрицательны?». Ведь в соответствии с формулой (1.1) выражение для n не изменится!

Означает ли это что вся электродинамика инвариантна по отношению к одновременной смене знаков перед \mathcal{E} и μ ? Или же вещества с отрицательными значениями \mathcal{E} и μ существенно отличаются по своим свойствам от веществ с положительными значениями \mathcal{E} и μ ? Или же само существование веществ с одновременно отрицательными значениями \mathcal{E} и μ в принципе невозможно, так оно нарушает какие-то основные физические законы?. Я не мог сразу дать ответы на эти вопросы, но я сразу понял, что эти вопросы принципиальны и нельзя отделаться шуточками типа «это все пустяки, это чисто математический парадокс, за этим на самом деле ничего не стоит», хотя именно такой подход к этой проблеме мне советовали многие мои коллеги. Я сразу понял, что за физикой материалов с одновременно отрицательными значениями \mathcal{E} и μ кроется нечто очень важное, и весь последующий ход событий подтвердил это мое предчувствие.

В результате я на несколько дней заперся в своем кабинете, попросил свою секретаршу не соединять меня с телефонными вызовами, и говорить всем что я отбыл в неизвестном направлении. За эти несколько дней я написал статью ¹, в которой было показано, что если \mathcal{E} и μ одновременно отрицательны, то следует приписать знак минус фазовой скорости v , волновому вектору $k = \omega / v = n\omega / c$, где ω - частота волны, и коэффициенту преломления $n = c / v$.

Отрицательное значение фазовой скорости v означает, что волновой вектор $k = \omega / v = n\omega / c$ направлен противоположно вектору Умова-Пойнтинга $S = [E \times H]$, направление которого от источника излучения к приемнику следует всегда признавать положительным. На саму возможность противоположной направленности векторов k и S указывалось и ранее ^{2,3,4,5}

но при этом не вводилось понятия отрицательного преломления и тем более, отрицательного коэффициента преломления $n < 0$.

Само признание факта существования отрицательного значения у волнового вектора k заставляет признать наличие у волны в случае отрицательных значений ϵ , μ и отрицательного импульса p , который, в соответствии с принципом корпускулярно-волнового дуализма, определяется известным соотношением

$$p = \hbar k \quad (1.3)$$

Наличие у волны с отрицательным k отрицательного импульса означает, что если эта волна поглощается или отражается каким-либо телом, то это тело испытывает давление, направленное к источнику излучения а не от него, как это имеет место в обычном случае, при

$$p = n\omega / c > 0 \quad (1.4)$$

Тем самым оказывается, что в средах с отрицательным преломлением, при $n < 0$ световое давление заменяется световым притяжением!

Отрицательное преломление и некоторые релятивистские эффекты

Этот парадокс со световым давлением не является единственным новым эффектом, связанным с отрицательным преломлением. С этим явлением связано еще несколько парадоксальных утверждений. Так, имеет смысл рассмотреть вопрос о переносе массы от источника к приемнику, если этот перенос осуществляется в среде с отрицательным преломлением. Для начала мы рассмотрим такой перенос, следуя работе Эйнштейна ⁶

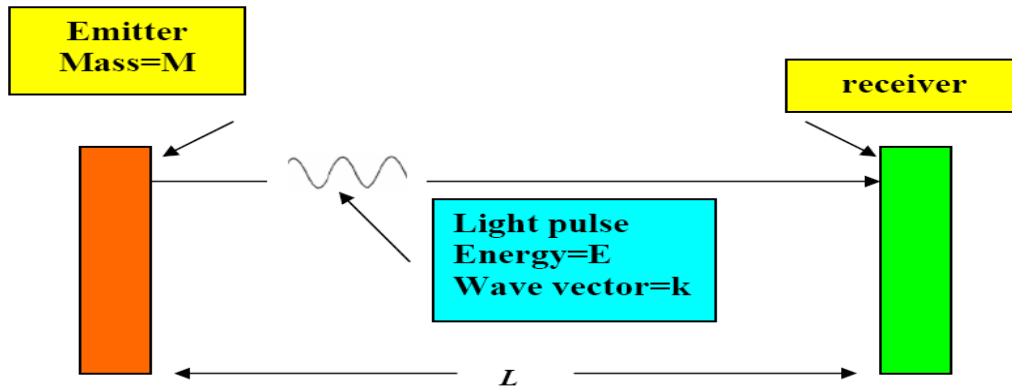


Рисунок 1

Для начала будем считать, следуя рисунку 1, что излучатель и приемник излучения находятся в вакууме, а расстояние между ними равно L . Короткий импульс света (волновой пакет, фотон) испускается излучателем и через время t , равное

$$t = L / c \quad (1.5)$$

достигает приемника. В момент испускания волнового пакета излучатель получает импульс отдачи, равный

$$P = E / c \quad (1.6)$$

и, тем самым, приобретает скорость V , равную

$$V = P / M \quad (1.7)$$

где M - масса излучателя. При этом за время t распространения света от излучателя к приемнику излучатель продвинется налево на расстояние x , равное

$$x = tV = LP / cM \quad (1.8)$$

Учитывая (1.6) из (1.8) имеем

$$xM = LE / c^2 \quad (1.9)$$

из этого соотношения видно, что если мы хотим сохранить неизменным положение центра инерции всей системы, то следует признать, что перенос

излучения с энергией E от излучателя к приемнику сопровождается переносом массы m

$$m = E / c^2 \quad (1.10)$$

на то же расстояние. При этом сами фотоны как известно, обладают нулевой массой.

Следующий очень нетривиальный вопрос касается величины c^2 в соотношении (1.10). Действительно, что такое эта величина, и какова ее реальная физическая значимость? Имеет ли эта величина конкретный физический смысл или же она служит только для выравнивания размерностей правой и левой частей соотношения (1.10)? И, наконец, обе величины c в соотношении (1.10) имеют одинаковый или различный физический смысл? Для прояснения всех этих вопросов посмотрим, откуда пришли две величины c в соотношение (1.10). Нетрудно видеть, что одна величина c пришла в (1.10) из (1.5) и имеет смысл групповой скорости c_{gr} , а другая величина c пришла из (1.6) и имеет смысл фазовой скорости c_{ph} . Таким образом соотношение (1.10) можно записать в виде

$$m = E / c_{ph} c_{gr} \quad (1.11)$$

Теперь также ясно, что если заполнить все пространство между излучателем и приемником веществом с фазовой скоростью v_{ph} и групповой скоростью v_{gr} , то выражение (1.11) будет иметь вид

$$m = E / v_{ph} v_{gr} \quad (1.12)$$

Из этого соотношения сразу следует, что при распространении электромагнитной волны в среде с отрицательным преломлением, когда v_{gr} и v_{ph} антипараллельны, масса переносится не от излучателя к приемнику, а,

наоборот, от приемника к излучателю. Тем самым нужно признать, что соотношение (1.10) является частным случаем более общего равенства (1.12). Таким образом мы видим, что введение в научный оборот понятия отрицательного преломления, и, в особенности, понятия отрицательного коэффициента преломления, позволило предсказать ряд новых эффектов и существенно расширило рамки классической электродинамики.

Заключение

К сожалению, экспериментальные работы по отрицательному преломлению не начались сразу же после появления теоретических исследований¹⁻⁵. Причиной этого было отсутствие в руках экспериментаторов материалов, в частности естественных, природных, материалов с $n < 0$. Положение резко изменилось после появления работы⁷ когда начался бум исследований по данной тематике, не прекращающийся до сих пор.

Литература

- ¹ Veselago V G Sov. Phys. Usp. **10** 509–514 (1968)
- ² Schuster A. An Introduction to the Theory of Optics (London: Edward Arnold and Co., 1904) [Translated into Russian (Leningrad-Moscow: ONTI, 1935)]
- ³ Mandelstam L I Zh. Eksp. Teor. Fiz. 15 475 (1945); Polnoe Sobranie Trudov (Complete Collection of Works) Vol. 2 (Ed. M A Leontovich) (Moscow: Izd. AN SSSR, 1947) p. 334; Polnoe Sobranie Trudov (Complete Collection of Works) Vol. 5 (Ed. M A Leontovich) (Moscow: Izd. AN SSSR, 1950) p. 419
- ⁴ Pafomov V E Zh. Eksp. Teor. Fiz. 36 1853 (1959) [Sov. Phys. JETP 9 1321 (1959)]
- ⁵ Sivukhin D V Opt. Spektrosk. 3 308 (1957)
- ⁶ Einstein A. Ann. Phys..20, 627 (1906)
- ⁷ Smith D.R. et al. Phys.Rev.Let., 84,4184, (2000)