

Взаимодействие волны с ускоряющимся объектом и принцип эквивалентности

А.И. Франк

В статье представлен новый взгляд на так называемый эффект ускоренного вещества. Ранее утверждалось, что эффект имеет оптическую природу и состоит в изменении частоты волны, прошедшей через преломляющий образец, движущийся с ускорением. Однако из простого рассмотрения, основанного на принципе эквивалентности, следует, что представление о связи эффекта только с явлением преломления является необоснованно узким, а изменение частоты волны неизбежно должно возникнуть при рассеянии на любом объекте, движущемся с ускорением. Таким объектом может являться как элементарный рассеиватель, так и любое устройство, передающее узкополосный сигнал.

Ключевые слова: ускоряющийся объект, рассеяние, волны, временная задержка, изменение частоты

PACS numbers: 03.75.Be, 41.20.Jb

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.07.038639>

Первое короткое упоминание об эффекте, получившем впоследствии название эффекта ускоряющегося вещества (ЭУВ), содержалось, по-видимому, в диссертации В.И. Микерова [1]. Анализируя возможность наполнения ловушки для ультрахолодных нейтронов (УХН) без её разгерметизации, он предложил использовать мембрану, движущуюся по гармоническому закону по и против движения УХН. При этом он нашёл, что энергия УХН после прохождения колеблющейся плёнки должна меняться. Будучи неопубликованным, этот результат долгое время оставался неизвестным.

В 1982 г. появилась работа Танака [2], в которой было найдено решение задачи о прохождении электромагнитной волны через линейно ускоряющуюся диэлектрическую пластину и предсказано, что частота прошедшей через такой образец волны отлична от частоты падающей волны. При однократном прохождении волны через пластину изменение частоты определяется следующим образом

$$\Delta\omega \cong \frac{\omega ad}{c^2} (n - 1), \quad \frac{ad}{c^2} \ll 1. \quad (1)$$

Здесь ω — частота падающей волны, n — показатель преломления, d — толщина пластинки, a — ускорение и c — скорость света. Возможность наблюдения этого оптического эффекта обсуждалась в [3], но, насколько нам известно, из-за малости эффекта соответствующий эксперимент так и не был поставлен.

В 1993 г. появилась работа Ковальского [4], целью которой было предложение проверки принципа эквивалентности в нейтронном эксперименте нового типа. Его теоретический подход основывался на представлениях о групповой и фазовой скоростях нейтрона, а также на вычислении времени

распространения волны между соответствующими точками в лабораторной системе координат и в системе, движущейся с ускорением. В обоих случаях волна проходила через преломляющий образец. В качестве промежуточного результата автор пришёл к выводу об изменении энергии нейтрона при его прохождении через образец, движущийся с не слишком большим ускорением. Величина изменения энергии определялась как

$$\Delta E = mad \left(\frac{1 - n}{n} \right), \quad (2)$$

где m — масса нейтрона.

Позднее этот же вопрос был рассмотрен Носовым и Франком [5]. Анализ, в котором проводилось последовательное вычисление скорости нейтрона при входе в образец, распространении его в среде и выходе его через другую поверхность, фактически основывался на классическом подходе. Для величины эффекта авторы получили формулу, совпадающую с результатом Ковальского (2).

Необходимо отметить, что в работе [5] формула (2) была получена в рамках двух важных допущений. Во-первых, делалось предположение о малости квантовых эффектов, а во-вторых, предполагалось, что движение вещества, в котором распространяется нейтронная волна, никак не сказывается на результате, а все изменения волновой функции возникают только за счёт движения границ образца.

Первое короткое сообщение об экспериментальном наблюдении изменения энергии нейтрона при прохождении через ускоряющийся образец появилось в 2006 г. [6]. Вскоре эксперимент был повторён в лучших условиях [7]. В обоих случаях измерялось изменение энергии ультрахолодных нейтронов, проходящих через образец, осциллирующий в пространстве. Переменное во времени ускорение образца достигало величин в $60 - 70 \text{ м с}^{-2}$. Для величины передачи энергии, составлявшей величину $(2 - 6) \times 10^{-10} \text{ эВ}$, было получено хорошее согласие с формулой (2).

Позже ускорение и замедление нейтронов при прохождении через осциллирующую пластинку преломляющего вещества наблюдалось в эксперименте, чувствительном к

А.И. Франк. Объединённый институт ядерных исследований, Лаборатория нейтронной физики им. И.М. Франка, ул. Жолио-Кюри 6, 141980 Дубна, Московская обл., Российская Федерация
E-mail: frank@nf.jinr.ru

Статья поступила 28 июня 2019 г.

скорости нейтронов [8]. Результаты также вполне удовлетворительно согласовывались с ожидаемыми.

Определённое развитие получил вопрос о физической интерпретации эффекта. Оптический подход к описанию его природы, восходящий к работе [2], естественным образом апеллировал к доплеровскому сдвигу частоты волны при преломлении в движущуюся среду [9]. При этом частота нейтронной волны в движущейся среде, измеренная в лабораторной системе, есть

$$\omega_i = \omega_0 + (n' - 1)k_0V, \quad V \ll v_0, \quad (3)$$

где ω_0 и ω_i — частоты падающей и преломлённой волн соответственно, n' — показатель преломления волны в системе координат движущегося вещества, v_0 и k_0 — скорость и волновое число падающей волны, а V — скорость среды и её границы.

Если нейтронная волна проходит через равномерно движущийся слой вещества, доплеровские сдвиги частоты, возникающие при прохождении волны через две его границы, равны по величине, но противоположны по знаку. Полный эффект изменения частоты равен при этом нулю. В случае же ускоренного движения сдвиги частот на входной и выходной поверхностях различны, поскольку за время распространения волны сквозь образец скорость границы изменяется на величину $\Delta V = at$, где a — ускорение, а t — время прохождения образца. В рассматриваемом случае преломляющего образца разность между частотами падающей и прошедшей нейтронных волн составляет

$$\Delta\omega = ad \frac{1 - n}{n} \frac{k_0}{v_0} = \frac{mad}{\hbar} \frac{1 - n}{n}, \quad V, at \ll v_0, \quad (4)$$

а изменение энергии $\Delta E = \hbar\Delta\omega$ определяется (2).

Относительно недавно наблюдалось изменение энергии холодных нейтронов, проходящих через ускоряющийся образец в условиях, близких к условию брэгговского отражения [10, 11]. Поясняя природу эффекта, авторы прибегают к аргументам, весьма близким к приведённым выше. Кажется очевидным, что наблюдаемый в этих работах эффект изменения энергии имеет, в сущности, ту же природу, что ЭУВ при преломлении, хотя детали явления во многом различны.

Оптический подход к описанию эффекта оказался продуктивным и впоследствии был распространён на случай двоякопреломляющего вещества. В случае нейтронной оптики явление двоякопреломления, хорошо известное в обычной оптике, обусловлено спиновой зависимостью показателя преломления. В работе [9] было показано, что в случае прохождения нейтрона через двоякопреломляющее вещество, движущееся с ускорением, возникает стационарное состояние с прецессирующим спином. Аналогичная ситуация может иметь место при прохождении двухкомпонентного нейтрино через слой ускоряющегося вещества. При этом волновая функция результирующего состояния меняется таким образом, что существенно изменяет характер эволюции нейтринного состояния при его последующем распространении в свободном пространстве.

Однако к выводу о существовании ЭУВ можно также прийти, не прибегая к конкретным оптическим вычислениям, а исходя только из принципа эквивалентности (ПЭ). Чтобы показать это, авторы работы [7] обратились к мысленному опыту Ковальского [4], но, в отличие от него, исходили из представления о несомненной справедливости ПЭ. Приведём здесь их аргументацию, поскольку это важно для дальнейшего.

На рисунке 1 представлен случай, когда нейтрон движется от источника к детектору, ускоряясь под действием силы тяжести. Очевидно, что энергия нейтрона в точке

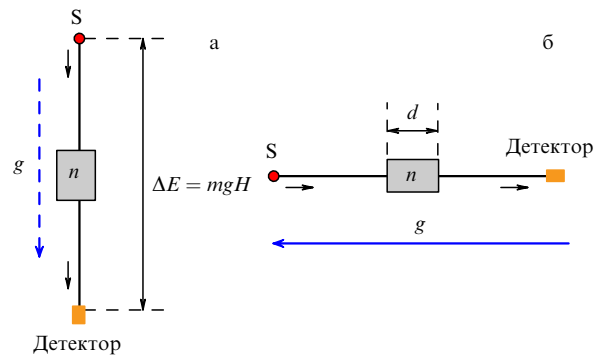


Рис. 1. Прохождение нейтрона через преломляющий образец в инерциальной системе в присутствии гравитации (а) и в неинерциальной системе координат (б).

регистрации превышает начальную энергию на величину mgH , где H — разность высот источника и детектора, а g — ускорение свободного падения. Введение на пути нейтрона преломляющего образца не меняет этого вывода. Обратимся теперь к случаю, изображённому на рис. 1б. Здесь источник, преломляющая пластинка и детектор движутся все вместе с ускорением $a = g$, находясь в неинерциальной системе координат, а движение нейтрона, наблюдаемое из лабораторной системы координат, является равномерным.

В силу принципа эквивалентности результаты всех измерений в неинерциальной системе должны быть такими же, как в инерциальной системе с гравитацией, что в полной мере относится и к измеряемой детектором энергии, а изменение энергии нейтрона на пути от источника к детектору должно быть равно, как и ранее, mgH . В тривиальном случае отсутствия образца это не вызывает сомнения. Однако введение на пути нейтрона преломляющей пластинки, движущейся с тем же ускорением, что и детектор, приводит к задержке во времени пролёта нейтрона, поскольку скорость нейтрона в веществе меньше, чем в вакууме (для определённости мы здесь полагаем $n < 1$). Пренебрегая небольшим различием в Δt для неподвижного и ускоряющегося образца, получим, что

$$\Delta t = \frac{d}{v_0} \frac{n - 1}{n}, \quad (5)$$

где d — толщина образца. За время задержки Δt детектор будет продолжать ускоряться. Дополнительное изменение его скорости в сравнении со случаем свободного пролёта есть $\Delta v = a\Delta t$.

Таким образом, если бы роль образца сводилась только к временной задержке, то в момент достижения нейтроном детектора его скорость относительно последнего, а стало быть, и измеренная энергия отличались бы от тех же величин в отсутствие вещества, что противоречит принципу эквивалентности. Следовательно, при прохождении нейтрона через ускоряющийся образец кроме задержки во времени должно происходить ещё и изменение энергии нейтрона, причём такое, чтобы скомпенсировать эффект ускорения детектора за время Δt . Вычисляя эту величину в соответствии с $\Delta E = mva\Delta t$, приходим к формуле (2).

Аналогичные рассуждения можно провести и для случая фотона. Временная задержка, возникающая из-за преломления света в среде,

$$\Delta t = \frac{d(n - 1)}{c}, \quad (6)$$

где c — скорость света. Доплеровский сдвиг частоты, обусловленный ускоряющимся детектором, есть в первом

порядке по v/c

$$\Delta\omega \approx \frac{\omega\Delta v}{c} = \frac{\omega a\Delta t}{c}. \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7), получаем формулу Танака (1).

Таким образом, исходя только из принципа эквивалентности и пренебрегая как релятивистскими, так и нестационарными квантовыми эффектами, можно получить выражения для величины ЭУВ, совпадающие с результатами более строгого теоретического анализа как для света, так и для медленной частицы. Формула (7), записанная в виде

$$\Delta\omega = ka\Delta t, \quad (8)$$

где k — волновое число, справедлива в обоих случаях.

Подчеркнём, что в приведённых выше рассуждениях мы пришли к выводу об изменении частоты волны, прошедшей через ускоряющийся образец, опираясь только на предположение о разном времени распространения волны в образце и вакууме, но никоим образом не на предположение о том, что эта разница связана именно с преломлением в веществе. Следовательно, этот вывод останется справедливым, если вместо преломляющего образца мы будем говорить просто об объекте, движущемся с ускорением и передающем сигнал с задержкой.

Многообразие таких объектов чрезвычайно велико. Известно, например, что в квантовой механике взаимодействие неизбежно связано с задержкой во времени, описываемой в первом приближении так называемым групповым временем задержки (ГВЗ)¹ [13–15]:

$$\tau = h \frac{d\varphi}{dE}, \quad (9)$$

где φ — фаза амплитуды взаимодействия, например рассеяния, а E — энергия. Таким образом, любой элементарный рассеиватель, движущийся с ускорением, должен менять частоту волны, причём речь идёт об эффекте, дополняющем обычный доплеровский сдвиг и пропорциональном не скорости, а ускорению.

С временной задержкой происходит любая передача сигнала, поэтому движущееся с ускорением устройство,

принимающее беспроводной сигнал и затем его передающее, неизбежно передаст сигнал с иной частотой. Таким устройством может быть, например, приёмо-передатчик радио или акустического сигнала или волоконно-оптическая линия, представляющая собой альтернативу преломляющей пластинке, рассмотренной Танака. Важно только, чтобы элемент устройства, принимающий излучение, т.е. приёмник, двигался бы с той же скоростью, что и излучатель. При этом приёмником и излучателем может служить принимающая и излучающая антенна или просто торец волновода или волоконной линии.

Автор благодарен Г.М. Арзумяну, В.А. Бушуеву, М.А. Захарову, Г.В. Кулину, С.В. Горюнову за плодотворные обсуждения.

Список литературы

1. Микеров В И, Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ФИАН, 1977) с. 105
2. Tanaka K *Phys. Rev. A* **25** 385 (1982)
3. Neutze R, Stedman G E *Phys. Rev. A* **58** 82 (1998)
4. Kowalski F V *Phys. Lett. A* **182** 335 (1993)
5. Носов В Г, Франк А И *Ядерная физика* **61** 686 (1998); Nosov V G, Frank A I *Phys. Atom. Nucl.* **61** 613 (1998)
6. Франк А И и др. *Письма в ЖЭТФ* **84** 435 (2006); Frank A I et al. *JETP Lett.* **84** 363 (2006)
7. Франк А И и др. *Ядерная физика* **71** 1686 (2008); Frank A I et al. *Phys. Atom. Nucl.* **71** 1656 (2008)
8. Франк А И и др. *Письма в ЖЭТФ* **93** 403 (2011); Frank A I et al. *JETP Lett.* **93** 361 (2011)
9. Франк А И, Наумов В А *Ядерная физика* **76** 1507 (2013); Frank A I, Naumov V A *Phys. Atom. Nucl.* **76** 1423 (2013)
10. Воронин В В и др. *Письма в ЖЭТФ* **100** 555 (2014); Voronin V V et al. *JETP Lett.* **100** 497 (2014)
11. Брагинец Ю П и др. *Ядерная физика* **80** 39 (2017); Braginets Yu P et al. *Phys. Atom. Nucl.* **80** 38 (2017)
12. Франк А И *ЭЧАЯ* **47** 1192 (2016); Frank A I *Phys. Part Nucl.* **47** 647 (2016)
13. Eisenbud L "The formal properties of nuclear collisions", Doctoral Dissertation (Princeton, NJ: Princeton Univ., 1948)
14. Bohm D *Quantum Theory* (New York: Prentice-Hall, 1951) p. 257; Пер. на русск. яз.: Бом Д *Квантовая теория* (М.: Наука, 1965) с. 305
15. Wigner E P *Phys. Rev.* **98** 145 (1955)

¹ Долгое время его называли фазовым временем задержки.

Interaction of a wave with an accelerating object and the equivalence principle

A.I. Frank

Joint Institute for Nuclear Research, Frank Neutron Physics Laboratory, Joliot-Curie st. 6, 141980 Dubna, Moscow region,

Russian Federation

E-mail: frank@nf.jinr.ru

The paper presents a new view of the so-called accelerating matter effect. It was stated earlier that the effect is optical by its nature and its essence is the change in the frequency of a wave transmitted through a refractive sample which is moving with acceleration. But as follows from a simple consideration based on the equivalence principle, the opinion on the relation of the effect only with the phenomenon of refraction is unjustifiably narrow, and the change in frequency must appear during scattering by any object moving with acceleration. Such an object may be an elementary scatterer or any device which transmits a narrow band signal.

Keywords: accelerating object, scattering, waves, time delay, change in frequency

PACS numbers: 03.75.Be, 41.20.Jb

Bibliography — 15 references

Received 28 June 2019

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **190** (5) 539–541 (2020)

Physics – Uspekhi **63** (5) (2020)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2019.07.038639>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2019.07.038639>