**Принцип эквивалентности и эффект ускорения**

**А.И.Франк**

В конце прошлого века было теоретически предсказано, что частота световой волны, прошедшей через преломляющий образец, движущийся с ускорением, отличается от начального значения. Позже аналогичное явление было предсказано и для нейтронных волн. Для света этот эффект очень мал и по-видимому до сих пор не наблюдался. Однако соответствующие нейтронно-оптические эксперименты оказались возможными и были поставлены группой ОИЯИ и ИЛЛ. В экспериментах с ультрахолодными нейтронами (УХН) было продемонстрировано, что энергия УХН, прошедших через преломляющий образец, двигающийся с ускорением, действительно меняется. И хотя изменение энергии составляло величину всего лишь порядка 10-10 эВ, оно было не только зафиксировано, но и измерено с точностью в несколько процентов. Тогда же было осознано, что речь идет о достаточно общем оптическом явлении, Эффекте ускоренного вещества, существование которого непосредственно следует из принципа эквивалентности. Такой вывод основывался на анализе мысленного эксперимента, в котором волна проходила через образец с преломляющим веществом либо в лабораторной системе в присутствии силы тяжести, либо в неинерциальной системе, в которой источник, образец и детектор двигаются с единым ускорением. Из требований идентичности наблюдаемых результатов и следовал вывод о существовании этого эффекта.

Значительно позже было понято, что представление о связи эффекта только с явлением преломления является необоснованно узким, а из принципа эквивалентности следует, что изменение частоты волны неизбежно должно возникнуть при рассеянии на любом объекте, движущимся с ускорением [1]. Таким объектом может являться как элементарный рассеиватель, так и любое устройство, передающее узкополосный сигнал. Речь, таким образом, идет о формулировке достаточно универсального Эффекта Ускорения (ЭУ), во многом аналогичного эффекту Доплера, но отличающегося от него тем, что изменение частоты определяется не скоростью объекта а его ускорением. Величина эффекта определяется соотношением , где - изменение частоты волны, *k* волновое число и - временная задержка, возникающая в результате взаимодействия с объектом.

Многие явления, в которых проявляется Эффект ускорения, могут быть объяснены исходя из представлений о дифференциальном эффекте Доплера. Простейшим примером этого является классический случай ретрансляция сигнала приемо-передатчиком движущимся с ускорением, и передающим сигнал с неизбежной задержкой. Таким же образом можно получить результат и для случая прохождения нейтронной волны через ускоряющийся образец, где частота волны меняется благодаря эффекту Доплера при преломлении волны на движущейся границе вещества. Из-за ускоренного движения образца сдвиг частоты на входной поверхности образца не полностью компенсируется обратным по знаку сдвигом, возникающим при прохождении волны через выходную поверхность.

Однако существуют случаи, когда представление о двух разделенных во времени фазах взаимодействия волны с объектом оказывается некорректным. К этому классу явлений относится рассеяние волны на микрообъектах, для анализа которых требуется квантово-механический подход. Поэтому закономерно возник важнейший вопрос о справедливости представления об ЭУ в квантовой механике. Положительный ответ был недавно получен в работе [2]. Путем численного решение ряда квантовых задач о рассеянии волнового пакета ускоряющимся потенциальными структурами было показано, что во всех случаях имеет место изменение энергии частицы, причем его величина в первом приближении определяется произведением ускорения на так называемое групповое время задержки.

Полагая, что ЭУ применим по отношению к квантовым явлениям, справедливо поставить вопрос о возможном изменении энергии при рассеянии нейтрона на ускоряющемся атомном ядре. Однако в этом случае групповое время задержки  оказывается столь малым, что оценка передачи энергии, основанная на приведенной выше формуле для сдвига частоты, оказывается меньше неопределенности в энергии  и, следовательно, этой формулой пользоваться нельзя. Однако, полагая, что и в этом случае Эффект ускорения все-таки существует, естественно предположить, что рассеяние на ускоряющемся одиночном ядре оказывается не изотропным и не упругим. Это ставит нас перед проблемой формулировки нейтронной оптики ускоряющихся сред как новой области науки.

Возможные направления дальнейших исследований видятся в настоящий время следующим образом. Прежде всего мы надеемся найти решение квантовой задачи о рассеянии частицы на точечном рассеивателе, движущимся с ускорением, что должно явиться основой для дальнейшего исследования рассеяния нейтронной волны на ансамбле ускоряющихся ядер.

Что касается новых экспериментов, то в настоящее время обсуждается две возможности. Во-первых, это квантовый эксперимент по наблюдению эволюции состояния при прохождении УХН через осциллирующую в пространстве потенциальную структуру. Кроме того, значительный интерес представляет наблюдение ЭУ при прохождении волны через двоякопреломляющий образец, результатом чего должно быть формирование нестационарного состояние, образованного двумя когерентными состояниями с различающимися частотами.

Литература

1. A.I. Frank. Physics-Uspekhi **53**, 500 (2020).
2. M.A. Zakharov, G.V. Kulin and A.I.Frank. Eur. Phys. J. D **75,**47 (2021).

**The equivalence principle and acceleration effect**

**A.I.Frank.**

At the end of the last century, it was predicted that the frequency of a light wave passing through a refractive sample moving with acceleration differs from the initial value. Later, a similar phenomenon was predicted for neutron waves. For light, this effect is exceedingly small and has apparently not been observed so far. However, the corresponding neutron-optical experiments turned out to be possible and were performed by a JINR - ILL group. In experiments with ultracold neutrons (UCN), it was shown that the energy of UCNs passing through a refractive sample moving with acceleration actually changes. And although the energy change was only of the order of 10-10 eV, it was not only recorded, but also measured with an accuracy of several percent. It was then realized that we are talking about a very general optical phenomenon, the Accelerated Matter Effect, the existence of which follows directly from the equivalence principle. This conclusion was based on the analysis of a gedanken experiment in which a wave passed through a sample with a refractive matter either in a laboratory frame in the presence of gravity or in a non-inertial frame in which the source, sample, and detector are moving with a common acceleration. The conclusion about the existence of this effect followed from the requirements of identity of the observed results.

Much later it was realized that the idea of ​​the effect being related only to the phenomenon of refraction is unreasonably narrow, and from the principle of equivalence it follows that a change in the frequency of the wave must inevitably occur at scattering by any object moving with acceleration [1]. Such an object can be either an elementary scatterer or any device transmitting a narrow-band signal. Thus, we are talking about the formulation of a universal Acceleration Effect (AE), in many ways similar to the Doppler effect, but differing from it in that the change in frequency is determined not by the velocity of the object but by its acceleration. The magnitude of the effect is determined by the relation , where is the change in wave frequency, *k* is the wave number, and  is the time delay resulting from interaction with the object.

Many phenomena in which the Acceleration Effect is manifested can be explained based on the concept of the differential Doppler effect. The simplest example of this is the classic case of signal retransmission by a transceiver moving with acceleration and transmitting a signal with an inevitable delay.

In the same way, it is easy to obtain the result for the case of a neutron wave passing through an accelerating sample, where the frequency changes due to the Doppler effect when the wave is refraction at the moving boundary of the sample.Due to the accelerated motion of the sample, the frequency shift at the input surface is not completely compensated by the shift of the opposite sign that occurs when the wave passes through the output surface.

However, there are cases when the idea of ​​two phases of interaction of a wave with an object separated in time turns out to be incorrect. This class of phenomena includes wave scattering on micro-objects, the analysis of which requires a quantum mechanical approach. Therefore, the most important question about the validity of the idea of ​​AE in quantum mechanics naturally arose. A positive answer was recently obtained in [2]. By numerically solving a number of quantum problems on the scattering of a wave packet by accelerating potential structures, it was shown that in all cases there is a change in the particle energy, and its value in the first approximation is determined by the product of the acceleration and the so-called group delay time.

Assuming that the AE is applicable to quantum phenomena, it is fair to pose the question of energy transfer in the scattering of a neutron by an accelerating atomic nucleus. However, in this case the group delay time is so small that the energy transfer estimate based on the above formula for the frequency shift is less than the uncertainty in energy  and, therefore, this formula cannot be used. However, assuming that in this case the acceleration effect does exist, it is natural to assume that scattering on an accelerating single nucleus is neither isotropic nor elastic. This confronts us with the problem of formulating neutron optics of accelerating media as a new field of science.

Possible directions for further research are currently seen as follows. First, we hope to find a solution to the quantum problem of particle scattering by a point scatterer moving with acceleration, which should form the basis for further studies of neutron wave scattering by an ensemble of accelerating nuclei.

As for new experiments, two possibilities are currently being discussed. First, this is a quantum experiment to observe the evolution of the state when UCN passes through a potential structure oscillating in space. In addition, of considerable interest is the observation of AE when a wave passes through a doubly refracting sample, the result of which should be the formation of a non-stationary state formed by two coherent states with different frequencies.

References

1. A.I. Frank. Physics-Uspekhi **53**, 500 (2020).
2. M.A. Zakharov, G.V. Kulin and A.I.Frank. Eur. Phys. J. D **75,**47 (2021).