

РЕЛЯТИВИСТСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 530.12:530.16:535.14:537.8

Климец А. П.

СКОРОСТЬ СВЕТА

В статье обсуждается скорость света и ее связь с пространством и временем

Ключевые слова: теория относительности, время, пространство.

Скорость света в вакууме занимает особое место в природе, потому что — по современным воззрениям — она является наибольшей возможной скоростью передачи взаимодействия между телами.

Ниоткуда не вытекает заранее, что в природе существует верхний предел для скорости передачи сигналов. Однако и теория и опыт как будто показывают, что все известные взаимодействия распространяются с конечной скоростью, а наибольшей скоростью передачи сигнала является скорость света в вакууме. Классическая же теория Ньютона молчаливо предполагала, что сигнал может распространяться бесконечно быстро.

Если принять, что в природе существует предельная скорость распространения сигналов, то ее абсолютная величина должна быть одна и та же во всех инерциальных системах отсчета. Ведь все эти системы, согласно принципу относительности, равноправны, и нельзя указать физический опыт, в результате которого можно было бы обнаружить различие между ними.

Если бы предельная скорость распространения взаимодействий была разной в разных инерциальных системах отсчета, стало бы возможным отличить одну инерциальную систему от другой. Если считать принцип относительности универсальным, это невозможно. Отсюда сразу же следует, что скорость света в вакууме должна быть одной и той же в любой инерциальной системе отсчета.

А если источник движется к наблюдателю или наблюдатель движется к источнику? Такое движение не может изменить величины предельной скорости передачи сигнала. Следовательно, скорость света в вакууме не может зависеть ни от движения источника, ни от движения наблюдателя.

Очевидно, что скорость света в вакууме, тем самым, наделяется уникальными свойствами. Все скорости являются относительными, т.е. меняются при переходе от одной инерциальной системы к другой. А абсолютная величина скорости  $c$  остается всегда одной и той же. Хотя среди инерциальных систем отсчета нет привилегированной, в них имеется одна *привилегированная скорость*. Оба эти обстоятельства неразрывно связаны с тем, что электромагнитные волны могут распространяться в вакууме; иными словами, для их распространения не требуется никакой материальной среды [1].

С формальной точки зрения в СТО дело обстоит так, как будто при изменении относительной скорости тела  $v$  возникает некая скорость  $c'$  (в неявном виде). Например, напишем формулы преобразований пространственных и временных интервалов:

$$l' = l_0 (1 - v^2/c^2)^{1/2}; \quad \Delta t' = \Delta t_0 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$$

Их можно переписать в следующем виде

$$l' = l_0 (c^2 - v^2)^{1/2}/c; \quad \Delta t' = \Delta t_0 c / (c^2 - v^2)^{1/2}$$

Величину  $(c^2 - v^2)^{1/2}$  можно положить равной скорости  $c'$ . Отсюда получим формально

$$c^2 = (c')^2 + v^2 \tag{1}$$

Уравнение (1) есть уравнение окружности в координатных осях  $v$  и  $c'$ , где радиус равен скорости света  $c$  (рис.1).

Если скорость  $v$  является пространственной скоростью какого-то материального процесса, то скорость  $c'$  является временной скоростью того же материального процесса. Из рис.1 видно, что если тело находится в относительном покое к пространственным осям какой-то инерциальной системы координат, то относительно временной оси оно «движется» со скоростью света, т.е. все равно находится в движении, но в движении по оси времени.

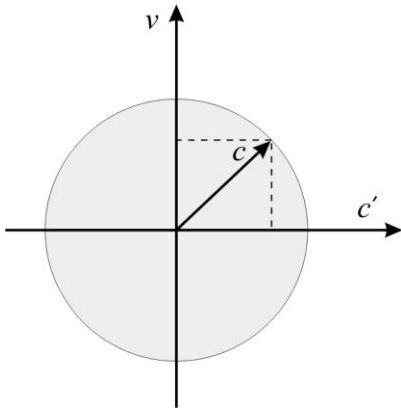


Рис. 1.  
уравнение Дирака

$$i\hbar (\partial \psi / \partial t) = (\gamma_0 E_0 + \gamma_1 P_x c + \gamma_2 P_y c + \gamma_3 P_z c) \psi$$

где  $\gamma_i$  — матрицы Дирака ( $i = 0, 1, 2, 3$ ).

Из принципа соответствия между двумя последними уравнениями имеем  $\gamma_i \equiv v_i / c$  и, таким образом, оператор скорости  $c'$  равен  $\gamma_0 c$ .

Отметим также следующее обстоятельство. Формальной единой основой для инвариантного интервала и энергии импульса служит соотношение (1). Действительно, если умножить это соотношение почленно на  $(c t_0)^2$  или на  $(E_0)^2$ , то, соответственно, мы получим соотношения для инвариантного интервала или энергии импульса частицы.

Можно записать выражение для инвариантного интервала следующим образом

$$dS = c' dt' = c dt_0 \quad \text{или} \quad c' = dS / dt'$$

Время  $t'$  в теории относительности является координатным временем. Отсюда следует, что скорость  $c'$  является координатной (или относительной) временной скоростью материального процесса.

Из всего вышеизложенного следует, что величина  $c'$  является не просто квадратичной разностью скоростей  $c$  и  $v$ , а играет в теории самостоятельную роль, аналогичную роли скорости  $v$ . То, что на этот факт совсем не обращается внимание, можно объяснить ее большой величиной, сравнимой со скоростью света при обычных условиях ( $v \ll c$ ). Однако при приближении скорости движущейся инерциальной системы отсчета к скорости света или при приближении ее к горизонту событий черной дыры замедление временных процессов в данной системе отсчета становится очевидным. Это связано с тем, что в этих случаях скорость  $c'$  приближается к своему нулевому значению.

Конечно, современная физика формально может и не вводить явно эту скорость, как это делается до сих пор, но в наших дальнейших статьях скорость  $c'$  играет заметную роль, поэтому мы специально выделяем этот момент в теории.

Скорость  $c'$  отвечает за скорость материального процесса во времени, в то время как скорость  $v$  отвечает за скорость материального процесса в пространстве. В соответствующей системе координат скорость света разлагается на одну компоненту скорости  $c'$  и три компоненты скорости  $v$ .

Можно сказать, что пространство и время, энергия и импульс относительны именно в силу того, что относительными являются пространственные и временная компоненты скорости света  $c$  в уравнении (1). Самостоятельный характер скорости  $c'$  проявляется не только в уравнении Дирака, но и в других случаях, в том числе и в общей теории относительности (ОТО), что будет отражено в следующей статье по ОТО.

А сейчас выясним, как тот же вопрос об абсолютной скорости света  $c$  решается в общепринятом формализме СТО [2].

Вектор скорости (4-вектор) материальной точки определяется в СТО следующим образом

$$U^a = dx^a / dS ; \dots U^0 = 1 / (1 - v^2 / c^2)^{1/2} ; \dots U^k = v^k / c (1 - v^2 / c^2)^{1/2} ;$$

Интересно отметить, что в релятивистской квантовой механике скорость  $c'$  присутствует в явном виде через операторы скоростей (т. е. через матрицы Дирака). Это легко показать. Энергия и импульс частицы выражаются через соотношение

$$E^2 = E_0^2 + P_x^2 c^2 + P_y^2 c^2 + P_z^2 c^2$$

Его можно, разделив на  $E$ , преобразовать к следующему виду

$$E = (c' / c) E_0 + (v_x / c) P_x c + (v_y / c) P_y c + (v_z / c) P_z c$$

Видно, что скорость  $c'$  входит в это соотношение симметрично вместе со скоростью  $v$ .

В квантовой механике для частиц со спином 1/2 имеем

где  $a, b = 0, 1, 2, 3$ ;  $v^k = dx^k / dt'$ ;  $k = 1, 2, 3$

С геометрической точки зрения  $U^a$  есть компонент единичного вектора касательной к мировой линии, т.е.

$$h_{ab} U^a U^b = 1 \tag{1'}$$

Обратите внимание на следующее обстоятельство: 3-вектор скорости  $v$  с компонентами  $v^k$ , а также все пространственные компоненты можно обратить в нуль выбором системы отсчета, в полном соответствии с обычным представлением о скорости как относительной величине. Но обратить в нуль все компоненты 4-вектора  $U^a$  невозможно никаким выбором системы отсчета. Это следует из того, что компоненты  $U^a$  образуют 4-вектор и, если он задан в одной системе координат, он будет присутствовать в любой другой, как бы она ни была повернута относительно первой. В частности, ее модуль всегда будет равен единице. Относительными, зависящими от выбора системы отсчета являются лишь его компоненты. Мы имеем здесь своеобразное возрождение ньютоновской идеи о скорости абсолютного движения, не требующей преимущественной системы отсчета, однако не в 3-мерном пространстве, а в 4-мерном пространстве-времени с псевдоевклидовой метрикой.

Каждая частица «получает» в момент рождения свой 4-вектор скорости и уже не расстается с ним все время, пока существует. В ее собственной системе отсчета, где она покоится ( $U^k = 0$ ), пространственные компоненты 4-вектора скорости также равны нулю, зато временная компонента  $U^0 = 1$ . Покоящаяся в обычном понимании частица движется, но только в направлении оси времени  $x^0 = c t$ , совпадающей в этом случае с линией собственного времени частицы, причем движется со скоростью света.

Перейти от формы (1') к форме (1) нетрудно. Действительно

$$U^a = dx^a / dS = dx^a / c' dt = v^a / c'; \quad \text{где } a, b = 0, 1, 2, 3$$

то есть

$$U^0 = 1 / (1 - v^2 / c^2)^{1/2} = c / c'; \dots \dots U^k = v^k / c (1 - v^2 / c^2)^{1/2} = v^k / c';$$

Отсюда получаем

$$h_{ab} U^a U^b = (c / c')^2 - S (v^k / c')^2 = 1; \quad k = 1, 2, 3$$

или  $c^2 - S (v^k)^2 = (c')^2$  и окончательно получим

$$c^2 = (c')^2 + S (v^k)^2$$

А это и есть форма (1).

Таким образом мы видим, что правомерна не только форма (1') для компонент 4-вектора скорости  $U^a$ , но также форма (1) для скорости света  $c$ . С нашей точки зрения, форма (1) более адекватна реальности с физической точки зрения. Она более наглядна. В принципе весь математический формализм специальной и общей теории относительности можно перестроить в соответствии с соотношением (1). В следующих статьях по СТО и ОТО мы придерживаемся именно такого подхода. Форма, в которой преподносится та или иная теория, имеет важнейшее значение для понимания ее сущности и во многом определяет ее дальнейшее развитие.

### Л и т е р а т у р а :

1. Угаров В.А. Специальная теория относительности, Москва, Наука, 1977, с. 32-33
2. Родичев В.И. «Методологические аспекты единой теории поля» в сборнике «Эйнштейн и философские проблемы физики XX века», Москва, Наука, 1979, с. 425-426

*Klimetz A. P.*  
**Velocity of light**

In the article the velocity of light and its connection with space and time are discussed.

*Keywords:* theory of relativity, time, space.

*Статья поступила в редакцию 04.11.2001 г.*