Доклады Академии наук СССР
1973. Том 210, № 6

УДК 530.12:531.18+530.12:531.51 ***ФИЗИКА***

Л. Я. АРИФОВ

ОДНОВРЕМЕННОСТЬ, ВРЕМЯ И ПРОСТРАНСТВО В ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

(Представлено академиком В. А. Фоком 27 IX 1972)

В широком классе систем отсчета (следует четко различать понятия системы отсчета и системы координат [1]), в которых $\chi_{ik} \neq 0$,

$$\chi_{ik} = -\frac{1}{2g_{00}\sqrt{-g_{00}}}\left[g_{0i}g_{0k,0} - g_{0k}g_{0i,0} + g_{00}(g_{0i,k} - g_{0k,i}) + g_{0k}g_{00,i} - g_{0i}g_{00,k}\right];$$

определение одновременности Эйнштейна [2] не обеспечивает возможности глобального описания физических процессов в пространстве и во времени. Для разрешения этой трудности осуществим в произвольной системе отсчета разделение четырехмерного пространства теории относительности (специальной и общей) на время и физическое пространство, опираясь, главным образом, на принцип причинности. Настоящее исследование необходимо рассматривать поэтому как продолжение работы [3].

Определение одновременности по Эйнштейну вытекает из постулата постоянства скорости света. Однако предположение о независимости скорости света от точки пространства и направления распространения является априорным и необоснованным, когда речь идет о неоднородном пространстве неинерциальной системы отсчета в специальной или о произвольном четырехмерном пространстве Римана в общей теории относительности. Ссылка на локальность измерения не является достаточным основанием для такого предположения, так как уже в синхронных системах отсчета из определения одновременности Эйнштейна для близких событий следует метрика трехмерного пространства, вообще говоря, неоднородного [3].

Предположение о независимости скорости света от направления распространения в известном смысле априорно даже в случае инерциальных систем отсчета, так как все лабораторные способы измерения скорости света констатируют независимость от направления «туда и обратно», но не «туда» или «обратно». Измерение же скорости света в одном направлении предполагает установление до измерения скорости света способа сравнения временных интервалов в разных пространственных точках, т. е. определение понятия одновременности, не включающего какое-либо знание о самой скорости света.

Таким образом, понятие одновременности первично и лежит в основе любого физического измерения, а значение скорости света является производным понятием одновременности. Из определения Эйнштейна, например, непосредственно следует постоянство локальной скорости света в синхронных системах отсчета. Но нет никаких оснований ожидать постоянства или хотя бы изотропности скорости света в несинхронных системах отсчета. Напротив, известный оптический опыт Саньяка [4] указывает на явную зависимость локальной скорости света от направления распространения во вращающейся системе отсчета, которая относится как раз к классу несинхронных. Но если скорость света по существу своему величина анизотропная, одновременные события не могут удовлетворять определению Эйнштейна. Поэтому, отказавшись от определения Эйнштейна, сформулируем такое понятие одновременности, которое исключает какие-либо явные или неявные предположения о свойствах скорости света, но основано на принципе причинности.

Рассмотрим две близкие пространственные точки P и P'. Пусть в точке P в моменты собственного времени $\tau(A_1)$ и $\tau(A_3)$ соответственно происходят события: A_1 — отправление светового сигнала и A_3 — возвращение его после отражения в точке P' в момент собственного времени $\tau(A_2')$. Назовем событие A_2 в точке P одновременным событию A_2', если значение собственного времени $\tau(A_2)$ удовлетворяет равенству

$$\tau(A_2) = \tau(A_1) + {}^1/_2 f[\tau(A_3) - \tau(A_1)]. \tag{1а}$$

Функция f зависит, вообще говоря, от координат x^α события, от дифференциалов dx^i, задающих направление $P \to P'$, и, наконец, от величины тензора χ_{ik}. На определении ее остановимся ниже, здесь же выпишем условия, вытекающие из принципа причинности и принципа соответствия:

$$0 < f(x^\alpha, dx^i, \chi_{ik}) < 2, \tag{1б}$$

$$f(x^\alpha, dx^i, \chi_{ik}) \to 1, \text{ когда } \chi_{ik} \to 0. \tag{1в}$$

Из (1а) и равенства нулю интервала ds вдоль светового луча следует дифференциальное уравнение, связывающее координаты одновременных событий. Используя его, можно получить выражение для отрезка собственного времени $d\tau$ между двумя любыми, вообще говоря, неодновременными, но близкими событиями:

$$d\tau = \sqrt{-g_{00}}\left(dx^0 + \frac{g_{0i}}{g_{00}}dx^i\right) + (f-1)\left[\left(g_{ik} - \frac{g_{0i}g_{0k}}{g_{00}}\right)dx^i dx^k\right]^{1/2}. \tag{2}$$

Уравнение одновременных точек запишется теперь в виде $d\tau = 0$. Потребуем, чтобы оно всегда допускало интегральное многообразие трех измерений. Тогда его решение определяет однопараметрическое семейство гиперповерхностей одновременных точек $u(x^0, x^i) = C = \text{const}$. По определению, гиперповерхность одновременных точек есть образ физического пространства в некоторый фиксированный момент времени, уравнение которого в разрешенной относительно координаты x^0 форме можно записать как $x^0 = \tilde{u}(x^i; C)$.

Легко видеть, что требование существования интегрального многообразия трех измерений уравнения $d\tau = 0$ определяет функцию f:

$$f(x^\alpha, dx^i, \chi_{ik}) = 1 + \left[\left(g_{ik} - \frac{g_{0i}g_{0k}}{g_{00}}\right)dx^i dx^k\right]^{-1/2} \cdot a_n\, dx^n, \tag{3}$$

где компоненты вектора a_i удовлетворяют условиям голономности формы Пфаффа, получающейся из формы (2) после подстановки в нее равенства (3):

$$a_{ik} - a_{k,i} - \left(\frac{g_{0k}}{g_{00}} + \frac{a_k}{\sqrt{-g_{00}}}\right)a_{i,0} + \left(\frac{g_{0i}}{g_{00}} + \frac{a_i}{\sqrt{-g_{00}}}\right)a_{k,0} + \\ + a_i\rho_k - a_k\rho_i = 2\chi_{ik}; \tag{4}$$

здесь

$$\rho_i = \frac{1}{2g_{00}}\left[2g_{0i,0} - g_{00,i} - g_{0i}(\ln g_{00})_{,0}\right].$$

Уравнения (4) дополняются предельными условиями, следующими из (1в) и (3), а именно:

$$a_i \to 0, \quad \text{когда} \quad \chi_{ik} \to 0.$$

Метрический тензор h_{ik} физического пространства совпадает с коэффициентами первой квадратичной формы гиперповерхности одновременных точек, поэтому

$$h_{ik} = g_{ik} - \frac{g_{0i}g_{0k}}{g_{00}} - a_i a_k.$$

Геометрический смысл неравенства (1б) состоит в существенной положительности длины пространственной кривой.

Повторяя рассуждения, использованные в [3], можно снова ввести выражение для времени t, измеренного в опорной точке $\{x_0^i\}$ между произвольным событием $\{x^0, x^i\}$ и событием $\{x_0^0, x_0^i\}$, выбранным за начало отсчета

$$t = \int\limits_{x_0^0}^{\tilde{u}(x_0^i;\, u(x^0,\, x^i))} \sqrt{-g_{00}(\xi, x_0^i)}\, d\xi, \tag{5}$$

а для дифференциала времени записать соотношение

$$dt = e^{\psi} \left\{ \sqrt{-g_{00}} \left(dx^0 + \frac{g_{0i}}{g_{00}}\, dx^i \right) + a_i a_k \right\}, \tag{6}$$

где

$$\varphi = \int\limits_{(x_0^i)}^{(x^i)} \beta_k (t = \mathrm{const}, x^n)\, dx^k, \quad \beta_i = \rho_i + \frac{1}{\sqrt{-g_{00}}}\, a_{i,0}.$$

Если время $t(x_0^0, x_0^i; x_2^0, x_2^i) - t(x_0^0, x_0^i; x_1^0, x_1^i)$ между любыми двумя событиями $\{x_1^0, x_1^i\}$ и $\{x_2^0, x_2^i\}$ зависит от опорной точки $\{x_0^i\}$, в которой оно измеряется, то геометрия пространства уже не зависит от выбора этой точки. Все события, одновременные относительно одной опорной точки, одновременны также и относительно любой другой; одна и та же совокупность событий, удовлетворяющих уравнению $dt = 0$, представляет физическое пространство во всех возможных опорных точках, но в разных опорных точках эта совокупность отнесена к разным моментам времени. Поэтому результат любого геометрического измерения, проведенного на пространственной гиперповерхности в некоторый момент времени относительно данной опорной точки, совпадает с результатом измерения, проведенного на пространственной гиперповерхности в соответствующий момент времени относительно другой опорной точки.

Из сформулированной одновременности событий следует эффект анизотропности скорости света в несинхронных системах отсчета. Для модуля скорости света v_c можно записать следующую формулу:

$$v_c = e^{-\varphi} (-a \cos \alpha + \sqrt{1 + a^2 \cos^2 \alpha}), \tag{7}$$

где a — модуль вектора a_i, α — угол между направлением распространения света и вектором a_i. Скорость света имеет наименьшее значение в направлении вектора a_i и наибольшее — в противоположном, но произведение значений скорости света в двух противоположных направлениях не зависит от угла α: $\sqrt{v_c \cdot \bar{v}_c} = e^{-\varphi}$, если $\bar{v}_c$ — модуль скорости $(-\vec{v}_c)$.

В синхронных и только синхронных системах отсчета $\chi_{ik} = 0$, поэтому $a_i = 0$, $\beta_i = \rho_i$, $\varphi = \Phi$ [3], а величина скорости света не зависит от направления распространения его.

Рассматривая в рамках специальной теории относительности равномерно вращающуюся систему отсчета [1] и вычисляя разность Δt отрезков времени прохождения лучом света замкнутого контура в противоположных направлениях, легко объяснить результат опыта Саньяка анизотропностью скорости света на вращающемся теле.

Институт ядерной физики
Академии наук УзбССР
пос. Улугбек Ташкентской обл.

Поступило
6 IX 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] В. А. Фок, Теория пространства, времени и тяготения, М., 1961. [2] А. Эйнштейн, Собр. научн. тр., 1, М., 1965. [3] Л. Я. Арифов, Н. С. Беспалова, ЖЭТФ, 58, 568 (1970). [4] M. G. Sagnac, J. Phys., 4, 177 (1914).