Преобразования Галилея

Валерий ПЕТРОВ

Введение

Общепринятым является мнение, что преобразования Галилея не удовлетворяют принципу относительности, как его сформулировал Эйнштейн, и не обеспечивают выполнение Эйнштейновского принципа постоянства скорости света. Полагают, что преобразования Лоренца – Эйнштейна удовлетворяют и принципу относительности, и принципу постоянства скорости света. В действительности, однако, уже при анализе опыта Майкельсона – Морли обнаруживается несоответствие теории этого опыта и преобразований Лоренца – Эйнштейна. Вместе с тем и анализ преобразований Галилея дает дополнительные основания для сомнений в истинности преобразований именно Лоренца – Эйнштейна, а не Галилея.

Исследование и анализ преобразований Галилея

Преобразования Галилея связывают переменные x, y, z и t одной системы координат с переменными x', z', y'и t'другой системы координат, движущейся относительно первой со скоростью v.

Пусть некоторая система координат $X'O'Y'$ движется со скоростью v вдоль оси OX другой системы координат XOY, как это изображено на рис. 1.

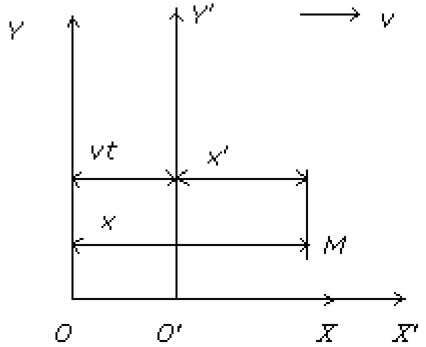

Рис. 1. Галилеевы преобразования координат точки M

Тогда, согласно Галилею, между параметрами x', y', z' и t' системы координат $X'O'Y'$ и параметрами x, y, z и t системы координат XOY имеют место следующие соотношения:

$$x' = x - vt, \tag{1}$$

$$y' = y;\ z' = z;\ t' = t. \tag{2}$$

Пусть в системе координат $X'O'Y'$ покоится точка M. Тогда x' есть координата этой точки в системе $X'O'Y'$; x – координата этой же точки в системе XOY; vt – расстояние между осями OY и $O'Y'$, измеряемое в системе XOY; t – промежуток времени, в течение которого система $X'O'Y'$ удалится от системы XOY на расстояние vt. Согласно Галилею, этот промежуток времени оказывается одинаковым и в одной, и в другой системе координат, т.е. $t = t'$.

Предположим, что в точке A на оси OX установлены какие-то часы. Предположим также, что в точке A' на оси $O'X'$ установлены точно такие же часы. Пусть в момент времени t точки A и A' совпадают. Предположим также, что в этот момент времени положение стрелок одних часов совпадает с положением стрелок других часов. За время t' система $X'O'Y'$ удалится от системы XOY на расстояние vt'. Предположим, что в этот момент времени из точки A' в направлении точки A излучается одиночный импульс звука. Известно, что скорость звука не зависит от состояния движения источника звука, следовательно, в системе XOY скорость звука будет равна, допустим, w. Тогда путь vt' одиночный импульс звука пройдет за время vt'/w. Таким образом, в момент, когда импульс звука достигнет точки A, по часам, установленным в этой точке, пройдет время, равное

$t = t' + vt'/w.$

Очевидно, что t больше t'. Однако это не означает, что движущиеся часы идут медленнее неподвижных, поскольку в течение времени vt'/w движущиеся часы продолжают идти и в момент прихода импульса звука в точку A положение стрелок этих часов будет соответствовать положению стрелок неподвижных часов.

Пусть t' – период колебаний звука, излучаемого источником звука в точке A'. Тогда:

$$t = t' + vt'/w \text{ или } t = t'(1 + v/w), \tag{3}$$

есть период колебаний звука в точке A. Таким образом, непосредственно из преобразований Галилея следует, что движение источника звука относительно приемника приводит к увеличению периода колебаний звука, принимаемого приемником. Уравнение (3) как раз и устанавливает величину этого изменения.

Выполним следующее преобразование:

$vt'/w = vt'w/w^2$

Величина $t'w$ есть путь L, который проходит звуковой импульс в неподвижной системе координат за время t'. Учитывая это, получим:

$$t = t' + vL/w^2 \tag{4}$$

Уравнение (4) эквивалентно уравнению (3), однако теперь ясный физический смысл уравнения (3) оказывается несколько затемненным, так как вместо множителя vt' появился множитель vL.

Предположим, что источник звука установлен в точке A, а приемник – в точке A'. Тогда путь vt одиночный импульс звука пройдет за время vt/w. В момент, когда этот импульс звука достигнет приемника, по часам, установленным в точке A' пройдет время, равное:

$t' = t + vt/w$ или $t' = t(1 + v/w)$.

Таким образом, и движение источника звука относительно приемника, и движение приемника звука относительно источника приводят к изменению периода колебаний звука, принимаемого приемником, однако при движении приемника звука со скоростью $v > w$ импульс звука вообще не достигнет приемника, тогда как при движении источника звука с такой скоростью импульс звука всегда достигнет приемника. Таким образом, по крайней мере, в механике, системы координат, одна из которых связана с приемником звука, а другая – с источником, оказываются *неравноправными*, хотя обе они являются инерционными, так как движутся одна относительно другой равномерно и прямолинейно без вращения.

Предположим теперь, что одиночный импульс звука проходит в *неподвижной* системе путь AC за время t. Предположим также, что одновременно с движением импульса звука из точки A в направлении той же точки C со скоростью v движется некоторое тело. За время t, в течение которого импульс звука пройдет путь AC, это тело пройдет путь $AB = vt$.

Обозначив путь AC как x и путь BC как x', получим:

$BC = AC - AB$;

$x' = x - vt$.

Так как система неподвижна, скорость звука в ней равна w. Это дает возможность выполнить следующие преобразования:

$x'/w = x/w - vt/w$;

$t' = t - t''$,

где $t' = x'/w$ – время, в течение которого импульс звука пройдет путь x'; $t = x/w$ – время, в течение которого импульс звука проходит путь x; $t'' = vt/w$ – время, в течение которого импульс звука проходит путь, равный vt.

Этот же результат можно записать иначе:

$t' = t - vt/w$;

$t' = t - vtw/ww$.

Произведение wt есть путь, который проходит импульс звука в неподвижной системе координат за время t, т.е. x. Учитывая это, получим:

$t' = t - vx/w^2$.

Это уравнение имеет тот же смысл, что и уравнение $t' = t - t''$ и *не является* преобразованием для t и t' при переходе от неподвижной к движущейся системе координат.

Выполним еще одно преобразование:

$x'/t' = (x - vt)/(t - vx/w^2)$;

$x'/t' = t(x/t - v)/t(1 - vx/tw^2)$.

Так как $x/t = w$ (напомним, что величины x, x', v, t и t' измеряются в одной и той же неподвижной системе координат), получим:

$x'/t' = (w - v)/(1 - vw/w^2)$;

$x'/t' = (w - v)/(1 - v/w)$;

$x'/t' = (w - v)/((w - v)/w)$;

$x'/t' = w$.

Следовательно, $w = (w - v)/(1 - vw/w^2)$ при любом значении v, меньшем w. Физический смысл этой формулы можно сформулировать следующим образом:

скорость звука в неподвижной системе координат не зависит от состояния движения других объектов в данной системе или относительно нее.

Предположим, что такой же опыт проводится с одиночным импульсом света. Пусть в момент времени t, когда точки A и A' совпадают, положение стрелок часов, установленных в точке A, совпадает с положением стрелок других часов, установленных в точке A'. За время t' система $X'O'Y'$ удалится от системы XOY на расстояние vt'. Предположим, что в этот момент времени из точки A' в направлении точки A излучается одиночный импульс света. Из астрономических наблюдений известно, что скорость света не зависит от состояния движения источника света, следовательно, в системе XOY скорость света будет равна c. Тогда путь vt' одиночный импульс света пройдет за время vt'/c. Таким образом, в момент, когда импульс света достигнет точки A, по часам, установленным в этой точке, пройдет время, равное:

$t = t' + vt'/c$.

Очевидно, что t больше t'. Это не означает, однако, что движущиеся часы идут медленнее неподвижных, поскольку в течение времени vt'/c движущиеся часы продолжают идти и в момент прихода импульса света в точку A положение стрелок этих часов будет соответствовать положению стрелок неподвижных часов.

Пусть t' – период колебаний света, излучаемого источником света в точке A'. Тогда:

$$t = t' + vt'/c \text{ или } t = t'(1 + v/c), \qquad (5)$$

есть период колебаний света в точке A. Таким образом, движение источника света относительно приемника приводит к увеличению периода колебаний света, принимаемого приемником. Уравнение (5) как раз и устанавливает величину изменения периода колебаний любого излучения в зависимости от скорости движения источника этого излучения.

Выполним следующее преобразование:

$vt'/c = vt'c/c^2$.

Величина $t'c$ есть путь L, который проходит луч света в неподвижной системе координат за время t'. Учитывая это, получим:

$$t = t' + vL/c^2. \tag{6}$$

Уравнение (6) эквивалентно уравнению (5), однако теперь ясный физический смысл уравнения (5) оказывается несколько затемненным, так как теперь вместо множителя vt' появился множитель vL.

Предположим, что источник света установлен в точке A, а приемник – в точке A'. Тогда путь vt одиночный импульс света пройдет за время vt/c. В момент, когда этот импульс света достигнет приемника, по часам, установленным в точке A' пройдет время, равное:

$t' = t + vt/c$ или $t' = t(1 +v/c)$.

Таким образом, и движение источника света относительно приемника, и движение приемника света относительно источника приводят к изменению периода колебаний света, принимаемого приемником, однако при движении приемника света со скоростью $v \geq c$ (разумеется, если это возможно) импульс света вообще не достигнет приемника, тогда как при движении источника света с такой же скоростью импульс света всегда достигнет приемника. Таким образом, системы координат, одна из которых связана с приемником света, а другая – с источником, оказываются неравноправными, хотя и являются инерциальными. Именно поэтому, а не по какой-либо еще причине, нужно предположить, что скорости больше скорости света «в пустоте» не бывает. Поскольку, однако, сумма величин c и v больше c, нужно придумать такое новое «релятивистское» правило сложения скоростей, чтобы эта сумма всегда была бы равна c при любой скорости v, меньшей либо равной c.

Предположим теперь, что одиночный импульс света проходит в неподвижной системе путь AC за время t. Предположим также, что одновременно с движением импульса света из точки A в направлении точки B со скоростью v движется некоторое тело. За время t, в течение которого импульс света пройдет путь AC, это тело пройдет путь $AB = vt$. Обозначив путь AB как x и путь AC как x', (рис. 2), получим:

$AC = AB - vt$; $x' = x - vt$.

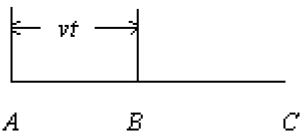

Рис. 2. Одновременное движение звуковой волны и материальной точки B

Так как система неподвижна, скорость света в ней равна c.

Выполним следующие преобразования:

$x'/c = x/c - vt/c$; $t' = t - t''$,

где $t' = x'/c$ – время, в течение которого импульс света пройдет путь x'; $t = x/c$ – время, в течение которого импульс света проходит путь x; $t'' = vt/c$ – время, в течение которого импульс света проходит путь, равный vt.

Этот же результат можно записать иначе:

$t' = t - vt/c$; $t' = t - vtc/cc$.

Произведение ct есть путь, который проходит импульс света в неподвижной системе координат за время t, т.е. x. Учитывая это, получим:

$t' = t - vx/c^2$.

Это уравнение имеет тот же смысл, что и уравнение $t' = t - t''$ и *не является* преобразованием для t и t' при переходе от неподвижной к движущейся системе координат.

Выполним еще одно преобразование:

$x'/t' = (x - vt)/(t - vx/c^2)$;

$x'/t' = t(x/t - v)/t(1 - vx/tc^2)$.

Так как x/t = с (напомним, что величины x, x', v, t и t' измеряются в одной и той же неподвижной системе координат), получим:

$x'/t' = (c - v)/(1 - vc/c^2)$;

$x'/t' = (c - v)/(1 - v/c)$;

$x'/t' = (c - v)/((c - v)/c)$;

$x'/t' = c$.

Следовательно, $c = (c - v)/(1 - vc/c^2)$ при любом значении v, меньшем c. Физический смысл этой формулы можно сформулировать следующим образом:

скорость света в ***неподвижной*** *системе координат не зависит от состояния движения других объектов в данной системе или относительно нее.*

Однако оказывается, что при желании этой формуле можно придать и иной физический смысл.

Предположим теперь, что имеется прибор, состоящий из источника звука и приемника, находящегося на расстоянии L от источника. Пусть прибор движется со скоростью v в направлении, перпендикулярном линии AB, соединяющей источник звука с приемником, как это изображено на рис. 3. Будем считать источник звука точечным, звуковые волны от которого распространяются во все стороны.

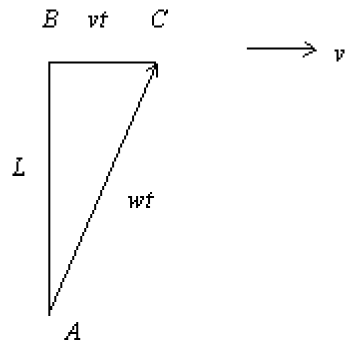

Рис. 3. Движение звуковой волны от точечного источника звука

Предположим, что источник излучает одиночную звуковую волну. За время, в течение которого фронт волны, движущийся перпендикулярно направлению движения прибора, пройдет путь $BC = L$, приемник сместится в точку C, в которую попадет фронт той же волны, движущийся под некоторым углом к направлению движения прибора. Как следует из треугольника ABC,

$(AC)^2 = (AB)^2 + (BC)^2.$

Так как $AB = L$, $BC = vt'$, где t' – время, в течение которого звуковая волна проходит путь AC, равный wt', получим:

$(wt')^2 = L^2 + (vt')^2,$

откуда следует:

$t'^2(w^2 - v^2) = L^2;$

$t'\sqrt{w^2 - v^2} = L;$

$t' w\sqrt{1 - \frac{v^2}{w^2}} = L;$

$t' = \frac{\frac{L}{w}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{w^2}}}$

Поскольку $L/w = t$ есть время, в течение которого звуковая волна проходит путь L, получим:

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{w^2}}} \text{ или } t = t'\sqrt{1 - \frac{v^2}{w^2}}. \tag{7}$$

Так как скорость звука в данной среде есть величина постоянная, получим:

$$wt' = \frac{wt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{w^2}}}; \quad L' = \frac{L}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{w^2}}} \text{ или } L = \frac{L'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{w^2}}}. \tag{8}$$

Физический смысл формулы (8) совершенно ясен:

путь AB меньше пути AC пропорционально множителю $\sqrt{1-\frac{v^2}{w^2}}$. Соответственно, путь AC больше пути AB обратно пропорционально тому же времени, следовательно, и время t', в течение которого звуковая волна проходит путь AC, больше времени t, в течение которого звуковая волна проходит путь BC, также обратно пропорционально множителю $\sqrt{1-\frac{v^2}{w^2}}$.

Никому не придет в голову, глядя на формулу (8) или формулу (7), утверждать, что первая описывает сокращение длины движущихся тел, а вторая – увеличение интервалов времени в движущихся системах координат. Однако, если в этих формулах w заменить на c, т.е. если предположить, что вместо источника звука в описанном выше опыте используется *точечный* источник света, утверждения о сокращении длины движущихся тел и замедлении времени в движущихся системах координат признаются величайшими достижениями современной науки.

Таким образом:

– формула $t' = t - vx/w^2$ не является преобразованием интервалов времени при переходе от неподвижной к движущейся системе координат;
– формула $w = (w - v)/(1 - wv/w^2)$не является формулой (или новым правилом) сложения скоростей;
– формула $L = \frac{L'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{w^2}}}$ не является формулой, описывающей сокращение длины движущихся тел;
– формула $t = t'\sqrt{1-\frac{v^2}{w^2}}$ не является формулой, описывающей увеличение интервалов времени в движущихся системах координат; ничего не изменится, если предположить, что вместо звуковой волны движется световая – и в этом случае ни одна из формул не будет иметь того смысла, который им придается в Эйнштейновской теории относительности;

– формула $t' = t - vx/w^2$ описывает изменение периода колебаний звука, излучаемого движущимся источником и принимаемого неподвижным приемником;
– формула $t = t' + vx'/w^2$ описывает изменение периода колебаний звука, излучаемого неподвижным источником и принимаемого движущимся приемником;
– аналогично, формула $t' = t - vx/c^2$ описывает «нерелятивистское» изменение периода колебаний света, излучаемого движущимся источником и принимаемого неподвижным приемником; соответственно, формула описывает «нерелятивистское» изменение периода колебаний света, излучаемого неподвижным источником и принимаемого движущимся приемником;
– «релятивистские» формулы отличаются от «нерелятивистских» множителем $\sqrt{1-v^2/c^2}$ при t' в одной формуле и при t в другой:

$$t'\sqrt{1-v^2/c^2} = t - vx/c^2 \text{ или } t' = (t - vx/c^2)/\sqrt{1-v^2/c^2};$$

$$t\sqrt{1-v^2/c^2} = t' + vx'/c^2 \text{ или } t = t' + vx'/c^2/\sqrt{1-v^2/c^2}.$$

Вывод: ни одна из перечисленных формул не имеет физического смысла, т.к. множитель $\sqrt{1-v^2/c^2}$ не соответствует теории опыта Майкельсона – Морли.

Дата публикации:

3 июля 2002 года