УДК 530.121

Звуковая модель и принцип Маха

Леонид Иосифович Филиппов[1], Вячеслав Витальевич Клименко[2,*]

[1] Лицей «Физико-техническая школа» Академический университет РАН
194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 6, корп. 3, литера «А»
[2] Академический университет РАН
194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 6, корп. 3, литера «А»;
[*]e-mail: slava.klimenko@gmail.com

В работе анализируется методика, где базовые физические процедуры теории относительности – синхронизация часов и измерение длин – осуществляются с опорой на сигналы, скорость которых привязана к скорости выделенной системы отсчета («среды»). В качестве примера рассмотрена модель, в которой наблюдатели используют «звуковые волны» для передачи информации. Разобран парадокс кажущегося несоответствия результатов представленной модели и стандартных преобразований Лоренца. Обсуждается принцип Маха и его применимость в рамках представленной модели.

Ключевые слова: теория относительности, приборный принцип, принцип Маха.

1. Введение

В работах [1, 2] была предложена логическая схема, которая показывает, что преобразования Лоренца для координат и времени являются естественным следствием предположения об изотропии и постоянстве скорости «светового сигнала» для некоторой «исходной» системы отсчета. При этом нет необходимости постулировать постоянство скорости света во всех инерциальных системах отсчета. Этот результат является следствием приборного эффекта измерений, где в качестве измерительного прибора используется световой сигнал. Механизм был показан в работе [2, 3]. Таким образом, предложенная система является самозамкнутой относительно кинематики, а именно, преобразования Лоренца воспроизводятся в мысленном эксперименте для других наблюдателей, что является проявлением принципа относительности. Этот подход может быть расширен на описание электромагнитных взаимодействий. В работе [4, 5] показано, что классическое магнитное взаимодействие движущихся зарядов является релятивистским эффектом их электростатического взаимодействия.

В данной работе рассматривается два вопроса, (i) о влиянии выбора «прибора», а именно, способа передачи информации о событиях, на получаемые преобразования координат и времени. Является ли использование светового сигнала необходимым для получения преобразований Лоренца, что получит наблюдатель, который будет использовать другой способ передачи информации - например, звуковые волны. Показан возникающий мнимый парадокс между теорией и результатами экспериментов, и обсуждаются возможные пути его решения. (ii) В рамках предложенной схемы описания электромагнитного взаимодействия рассмотрен принцип Маха, возникновение инертной массы тела в неинерциальной системе отсчета как следствие релятивистского эффекта гравитационного взаимодействия тела с гравитационным полем, создаваемым всеми другими телами во Вселенной.

2. Звуковая модель

Рассмотрим модель, в которой для измерения длин отрезков и передачи сигналов используются звуковые волны. В данном случае звуковой сигнал является некоторым модельным источником информации, заменяющим электромагнитные волны («свет»), и вместо него может быть рассмотрен любой другой способ передачи информации. Предположим также, что наблюдатель не имеет информации о световых сигналах, и покажем картину событий, описанную таким наблюдателем.

Систему отсчета, связанную с неподвижным наблюдателем, назовем «воздушной выделенной» (ВВ), если среда, в которой распространяются звуковые волны («воздух»), покоится. В этой системе отсчета часы, синхронизированные с помощью «звукового сигнала», будут синхронизированы также и «по свету». Если в середину отрезка, расположенного в ВВ, световые сигналы от событий на его концах приходят одновременно, то звуковые – тоже одновременно (просто звуковые – позже). Согласно предложенной в работах [1, 2] схеме, чтобы измерить длину движущегося отрезка, наблюдатель фиксирует начало и конец отрезка так, чтобы звуковые сигналы (и световые сигналы) от событий фиксации пришли в середину отрезка одновременно. Наблюдатели в ВВ системе отсчета и равномерно движущихся системах отсчета принимают постулат о постоянстве и изотропии скорости сигнала, а именно скорости звука, которую здесь и далее будем обозначать *e*. Исходя из этого принципа, они делают следующие теоретические рассуждения.

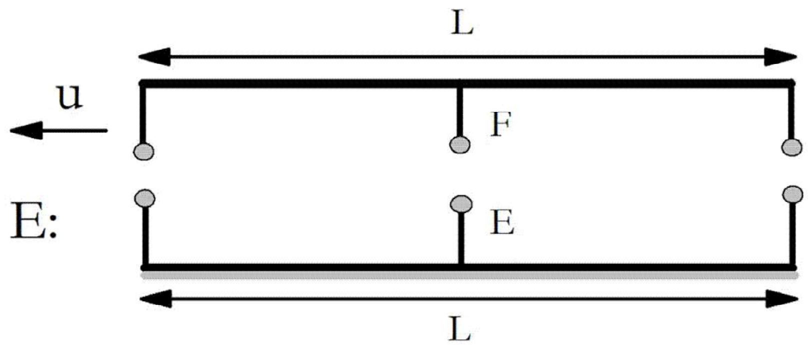

Рисунок 1. Измерение длины движущегося отрезка в системе отсчета *E*.

Мимо наблюдателя E в ВВ системе отсчета, находящегося в центре неподвижного отрезка длиной L, со скоростью u пролетает отрезок, концы которого соприкасаются с концами отрезка в системе E одновременно, и звуковые сигналы от соприкосновений приходят в центр отрезка в один и тот же момент. В рамках принятой аксиоматики с точки зрения наблюдателя E длина движущегося отрезка равна L, отрезки равны. На рис. 1 показана картина измерения длины движущегося отрезка с точки зрения наблюдателя E: точка F движется влево навстречу звуковому сигналу от соприкосновения левых концов отрезков и удаляясь от сигнала, приходящего справа. Сигналы, пришедшие к точке E одновременно, к точке F придут с рассогласованием во времени (измеренному в E):

$$\Delta t_E = \left(\frac{L}{2(e-u)} - \frac{L}{2(e+u)} \right) = \frac{L}{u} \left(\frac{1}{\frac{e^2}{u^2} - 1} \right). \tag{1}$$

Предположим, что наблюдатель F в движущейся системе отсчета рассуждает в рамках таких же принятых аксиом. На рис. 2 показана картина событий, построенная наблюдателем в системе отсчета F. Из того факта, что сигнал слева приходит раньше, чем сигнал справа, наблюдатель F делает вывод, что длина движущегося отрезка (система E) меньше, чем длина отрезка в его системе (которая равна L).

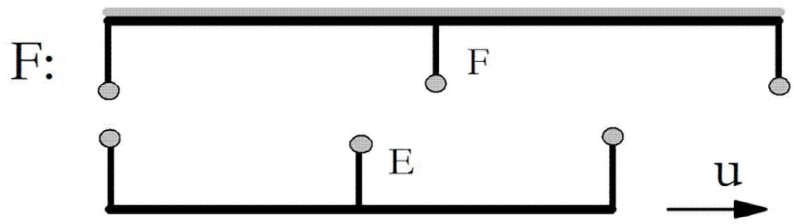

Рисунок 2. Измерение длины в системе отсчета *F*.

Продолжая строить логику на гипотезе о том, что все равномерно движущиеся системы отсчета равноправны, мы должны теперь найти такие преобразования для длин отрезков и промежутков времени $\beta(u,e)$, которые в рамках данной аксиоматики непротиворечиво описывали бы имеющуюся экспериментальную ситуацию: наблюдатель в одной из систем (E) видит, что «покоящийся» и «движущийся» отрезки равны $L_E = L_F = L$, а наблюдатель в другой системе (F) – что длины тех же отрезков различны. Отрезок, длина которого в покое равна L, будучи измеренным в движении (системой F), имеет меньшую продольную длину:

$$L_E = \frac{L}{\beta(u;e)}, \tag{2}$$

где u – скорость движения этого отрезка, e – скорость звука: ни от каких других параметров функция преобразования длины зависеть не может. В нашу систему аксиом входит положение об изотропии пространства (также экспериментально подтвержденное), поэтому выбрана линейная зависимость.

Продолжая ту же логику, проследим за изменением промежутка времени. Рассмотрим два события, одноместные в системе отсчета F с промежутком времени Δt_F. Пусть наблюдатель F, оставит на отрезке, расположенном в системе E, отметки, расстояние между которыми с точки зрения F равно $u\Delta t_F$. Так как эти отметки ограничивают отрезок, неподвижный в системе E, то его длина, измеренная наблюдателем Е, равна $u\Delta t_F\beta(u,e)$. Скорость движения точки F, измеренная E, равна u, следовательно, по часам Е между этими же событиями прошло большее время:

$$\Delta t_E = \Delta t_F \beta(u,e). \tag{3}$$

Далее, с точки зрения наблюдателя F отрезок в системе E короче, чем отрезок в его системе на $u\Delta t_F$. Тогда длина отрезка в системе F равна:

$$\frac{L}{\beta(u;e)} + u\Delta t_F = \frac{L}{\beta(u;e)} + u\left(\frac{L}{u}\frac{1}{\frac{e^2}{u^2}-1}\right)\frac{1}{\beta(u;e)}. \tag{4}$$

В то же время длина отрезка в системе F с точки зрения системы E равна L, а отношение длин $\beta(u,e)$. Отсюда получаем условие на функцию преобразования $\beta(u,e)$:

$$\beta(u;e) = \frac{1}{\beta(u;e)} + \frac{1}{\frac{e^2}{u^2}-1}\frac{1}{\beta(u;e)}. \tag{5}$$

Откуда

$$\beta(u;e) = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{e^2}}}. \tag{6}$$

Таким образом, оставаясь в рамках принятой аксиоматики, мы получаем в модельной «звуковой вселенной» преобразования Лоренца для продольной длины движущегося отрезка и для промежутка времени, разделяющего события, одноместные в движущейся системе отсчета. Наблюдатели, действующие в принятых условиях, проводя измерения скорости звука и относительной скорости равномерно движущихся систем с доступной им точностью, получат, как было показано, результаты, приводящие их к следующей гипотезе: (1) неразличимость равномерно движущихся систем отсчета, то есть принцип относительности, распространяющийся на любые опыты, включая опыты со звуком; (2) принцип постоянства скорости звука – при измерениях она получается одинаковой, независимо от движения источника или наблюдателя.

2.1. Парадокс

Используя данную логическую схему пара наблюдателей, использующие «звуковой» и «световой» сигнал, получат выражения, аналогичные преобразованиям Лоренца, как это было показано в статье [1]. Единственное отличие результатов будет заключаться в том, что в выражениях, полученных «звуковым наблюдателем», скорость света в привычных нам выражениях будет заменена на скорость звука.

Однако эксперименты показывают (опыт Физо, опыт Майкельсона-Морли, аберрация света, опыт Айвса и Стилуэлла, см. например, [6]), что сокращение длины движущегося отрезка описывается уравнениями, в которые входит скорость света, а не звука. Это создает мысленный парадокс: поскольку сама движущаяся система отсчета никакого участия в измерении длины не принимает, а ход ее часов и способ, которым они были синхронизированы, роли не играет, то получается, что некая волшебная сила как бы выделяет скорость света, хотя в данной ситуации звуковые сигналы «ничем не хуже». Более того, свет из данного процесса измерения можно исключить вовсе, однако сокращение длины будет «световым», а не «звуковым». Возникает ощущение объективной независимости процесса измерения от «прибора», с помощью которого это измерение проводится – световых сигналов. Можно сказать, что скорость света появляется в конечном результате как бы чудесным образом.

2.2. Решение

По-видимому, наблюдаемые явления и законы природы связаны с распространением и возмущением электромагнитного и гравитационного полей, скорость которых считается в современной науке равной скорости света. Именно свет «выбран» природой в качестве способа передачи информации, и именно скорость света входит в преобразования Лоренца и другие релятивистские эффекты. Тот факт, что «звуковой» наблюдатель, измеряет сокращение длины и промежутка времени согласно преобразованиям Лоренца со скоростью звука, является следствием его методики измерений и синхронизации часов.

Однако сравнение со звуковым наблюдателем позволило сделать вывод, что при высокой точности измерений можно обнаружить рассогласование результатов, полученных наблюдателями в разных инерциальных системах отсчета. Это создает потенциальный способ поиска ВВ системы, или по аналогии «световой» выделенной (СВ) системы. Для этого отвлечемся от показанных ранее построений и рассмотрим следующую схему. Пусть имеются две системы отсчета, равномерно движущиеся относительно ВВ со скоростями V_1 и V_2, которые велики по сравнению со скоростью их движения друг относительно друга, т.е. $V_1, V_2 >> |V_1 - V_2|$.

Измеряя скорости друг друга, наблюдатели в этих системах отсчета получат очень близкие результаты (см. [2]).

$$u_{21} = (V_2 - V_1)\frac{e^2 - V_1^2}{e^2 - V_1 V_2} \tag{7}$$

и

$$u_{12} = -(V_2 - V_1)\frac{e^2 - V_2{}^2}{e^2 - V_1 V_2} \tag{8}$$

Это же верно для результатов, которые получит каждый из этих наблюдателей, измеряя скорость звука.

$$e_{1,2} = e\left(1 - \frac{V_{1,2}{}^2}{e^2}\right) \tag{9}$$

Кроме того, так как часы в каждой из этих систем отсчета синхронизированы с помощью звуковых сигналов, скорость звука для каждого из наблюдателей внутри его системы будет одинакова во всех направлениях. Реально – при достаточно высокой точности измерений – есть асимметрия и при измерении относительной скорости движения рассмотренных систем отсчета, и при измерении скорости звука, сделанном в каждой из них. Наблюдатель в системе, движущейся относительно воздуха, измеряя скорость системы ВВ, получит меньший результат, чем наблюдатель в ВВ, измеряющий скорость первой системы. При измерении длины движущегося объекта из самой ВВ не будет «сокращения длины», как не будет и «замедления времени». По мере приближения скорости одной из систем к такой, при которой она совпадет с выделенной – то есть с ВВ – асимметрия растет.

Более того, при идеальной точности измерений в системах, равномерно движущихся относительно ВВ и использующих звук для синхронизации часов, можно, продвигаясь в сторону той из систем, скорость которой относительно ВВ меньше, выйти в конечном итоге на систему, которая покоится относительно воздуха – то есть на саму ВВ.

3. Принцип Маха

Зависимость свойств инерции данного физического тела от пространственного распределения и характеристик движения всех других материальных объектов во Вселенной как физико-философский принцип была сформулирована Эрнстом Махом в работе [7] и носит имя этого философа. Несомненно, принцип Маха повлиял на молодого Альберта Эйнштейна при создании его первых работ по теории относительности [8, 9], хотя впоследствии Эйнтштейн достаточно резко критиковал как сам принцип, так и философию Маха. Тем не менее, более чем через полвека после создания специальной теории относительности (СТО) и сорок шесть лет после создания общей (ОТО), принцип Маха был активно использован Брансом и Дикке при анализе инертности тел и создании на основе этого анализа некоторого класса теорий, обобщающих ОТО, где гравитационная постоянная является гипотетическим меняющимся полем, зависящим от распределения масс и энергии-импульса во Вселенной [10, 11]. Ниже в рамках нашего рассмотрения мы изучим инертность тел в системе отсчета, вращающейся относительно «неподвижной как целое» Вселенной.

Покажем, что на основании конечности скорости распространения сигналов можно получить следующее: во вращающейся неинерциальной системе отсчета центробежная сила инерции является следствием гравитационного взаимодействия тела со всеми телами Вселенной. Этот результат соответствует принципу Маха [7], объясняющему эквивалентность инертной и гравитационной масс.

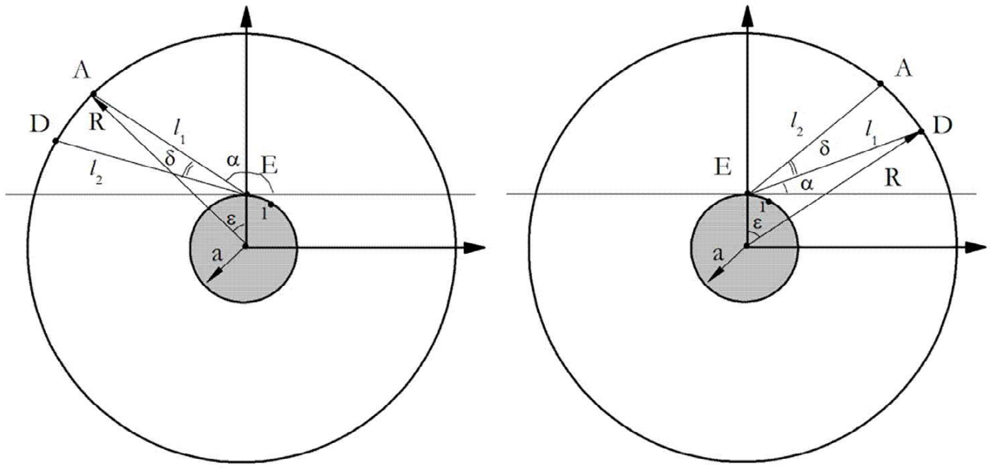

Рисунок 3. Схема расчета для верхней полусферы.

Пусть наблюдатель E находится в системе, вращающейся с постоянной угловой скоростью ω по окружности радиуса a относительно исходной неподвижной системы отсчета («неподвижной Вселенной»). Пусть в неподвижной системе отсчета есть однородное распределение гравитационной массы. Для описания этой системы используем сферическую систему координат с началом в центре окружности, по которой движется наблюдатель E. Схема движения представлена на рис. 3. Если бы наблюдатель E покоился (или двигался с постоянной скоростью), суммарная сила гравитационного притяжения “пробной массы” с веществом в верхней и нижней полусферах пространства была бы нулевой. Покажем, что при переходе во вращающуюся систему координат, наблюдатель E будет наблюдать изменение распределения массы в верхней и нижней полусферах неподвижной системы отсчета.

На правой панели рис. 3 показана схема расчета для верхней правой полусферы (относительно положения наблюдателя E). Рассчитаем в первом приближении взаимодействие точечной массы (наблюдателя E) с соосной окружностью большего радиуса R, лежащей в плоскости движения. Положение точек окружности с координатой $y > a$ можно описывать параметром α – углом между направлением от наблюдателя E на точку и направлением скорости наблюдателя E. В рассматриваемой схеме наблюдатель находится в верхней точке окружности, и его скорость параллельна оси абсцисс. Угол меняется в диапазоне $0 < \alpha < \pi$ для верхней полуплоскости и $-\pi < \alpha < 0$ для нижней.

1) Сначала представим, какое изображение на «мгновенном снимке» окружности радиуса R увидит покоящийся наблюдатель, расположенный в точке E, точнее, опишем сам процесс наблюдения и прихода сигналов.

Рассмотрим произвольные точки D и A с соответствующими углами α и $\alpha+\delta$. Отследим сигналы, приходящие к наблюдателю E в один и тот же момент времени. Поскольку расстояния между точками $E-D$ и $E-A$ разные, то сигналы, принятые наблюдателем в точке E в один и тот же момент времени, вылетели из точек A и D в разное время. Световой сигнал из точки D вылетел позже, чем из точки A, на время Δt_0:

$$\Delta t_0 = \frac{l_1}{c} - \frac{l_2}{c}. \tag{10}$$

Мы можем выразить расстояния l_1 и l_2 через R, a и углы α, δ и с точностью до первого порядка a/R записать как:

$$\frac{l_1}{R} = \sqrt{1 - \frac{a^2}{R^2}\cos^2\alpha} - \frac{a}{R}\sin\alpha \approx 1 - \frac{a}{R}\sin\alpha \tag{11}$$

$$\frac{l_2}{R} \approx 1 - \frac{a}{R}\sin\left(\alpha + \delta\right) \tag{12}$$

2) Теперь представим, что наблюдатель E движется по окружности радиуса a вправо по часовой стрелке. Поскольку точка Е приближается быстрее к точке A, чем к точке D (проекция скорости на направление к точке A больше, чем к точке D), сигналы от точек A и D будут одновременно приходить к наблюдателю E с меньшим рассогласованием по времени $\Delta t_1 < \Delta t_0$. Эффективно это воспринимается как «сокращение» длины дуги по сравнению с длиной, измеренной в покое: та же дуга будет видна на снимке под углом, который меньше, чем угол δ.

Рассчитаем разницу времени прихода сигналов к движущемуся наблюдателю E. Представим, что наблюдатель E сдвинулся на расстояние x вдоль окружности a – точка 1 на рис. 3. Теперь расстояние от него до точек A и D будет y_1 и y_2. Тогда разность времен прихода сигнала от точек A и D в точку 1 будет равна

$$\Delta t_1 = \frac{y_1}{c} - \frac{y_2}{c} \tag{13}$$

и она меньше, чем Δt_0 на величину

$$\Delta t = \Delta t_1 - \Delta t_0 = \frac{(l_1 - l_2) - (y_1 - y_2)}{c}, \tag{14}$$

что приближенно

$$\Delta t \approx \frac{x^2}{2c}\frac{\left(l_1 - l_2\right)}{l_1 l_2} + \frac{x}{c}\cdot\delta\cdot\sin\alpha\,. \tag{15}$$

Пусть скорость движения наблюдателя E относительно исходной системы равна V. Тогда можно показать, что

$$x \approx \frac{l_1}{\dfrac{c}{V} + \cos\alpha}\,. \tag{16}$$

Тогда из уравнения (11) и (12) следует

$$l_1 - l_2 \approx a\delta\cos\alpha \tag{17}$$

и

$$l_1 l_2 \approx R^2 - aR\left(2\sin\alpha + \delta\cdot\cos\alpha\right). \tag{18}$$

Подставляя в уравнение (16), получим:

$$\Delta t \approx \frac{V^2\cdot a\cdot\delta\cdot\cos\alpha}{2c^3} + \frac{V\cdot R\cdot\delta\cdot\sin\alpha}{c^2}\,. \tag{19}$$

Первое слагаемое будет того же порядка, что второе, лишь при столь малых α, что tgα= $(V/c)(\alpha/R)$, то есть может быть отброшено как не играющее роли:

$$\Delta t \approx \frac{V\cdot R\cdot\delta\cdot\sin\alpha}{c^2}\,. \tag{20}$$

Это “t, измерено в исходной системе, события при этом одноместны в системе E, то есть наблюдатель E получит то же “t, следовательно

$$\Delta t = \frac{\delta - \delta_1}{\omega_1}, \tag{21}$$

где ω_1 это угловая скорость точек A и D, измеренная в системе E, δ угловая величина дуги DA; δ_1 – величина дуги, заменяющей в движении дугу ***DA*** «на снимке» (в верхней полусфере $\delta_1 < \delta$). Далее, определим, что ω_1, угловая скорость точек A и D в системе E, связана с угловой скоростью, измеренной в исходной системе отсчета $\omega_0 = \dfrac{d\alpha}{dt}$, как

$$\frac{\omega_1}{\omega_0} = \frac{\delta_1}{\delta}\,. \tag{22}$$

Учитывая, что $a \ll R$, в пределах принятой точности $\omega_0 = \omega = d\varepsilon/dt$, угловой скорости вращения наблюдателя E по окружности a.

Объединяя все это, приравниваем (20) и (21) и, отбрасывая заведомо малые слагаемые, получаем

$$\frac{\delta - \delta_1}{\delta_1} \approx \frac{\omega^2\cdot a\cdot R\cdot\sin\alpha}{c^2} > 0 \tag{23}$$

и $\delta_1 < \delta$.

Если рассмотреть левую часть верхней полуплоскости $\pi/2 < \alpha < \pi$ (левая панель рис. 3), то подобным рассуждением мы видим, что наблюдатель E быстрее удаляется от точки D, чем от точки A. Выполняя те же рассуждения, получаем, что, для «верхней» полусферы ($0 < \alpha < \pi$) при измерении из движущейся системы наблюдается сокращение длины отрезка, расположенного в исходной системе отсчета, по сравнению с его длиной в покое.

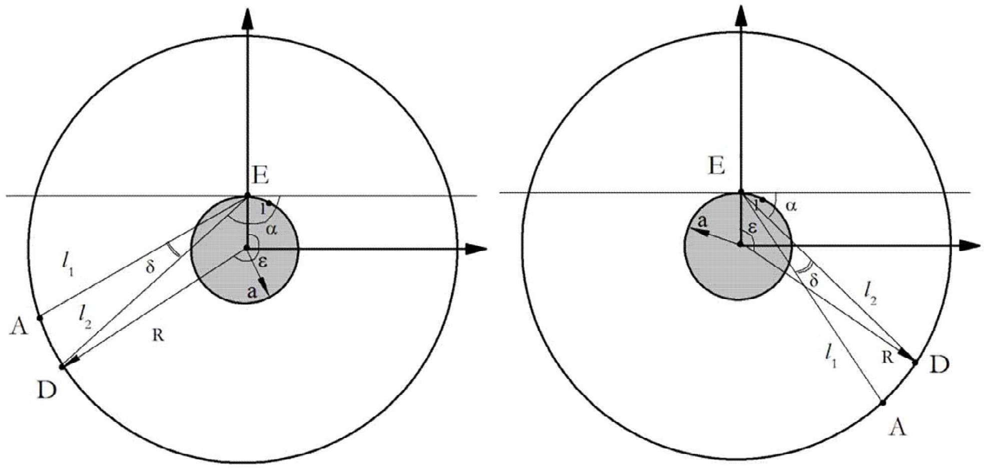

Рисунок 4. Схема расчета для нижней полусферы.

На рис. 4 показана картина для расчета разницы прихода сигналов для нижней полуплоскости относительно наблюдателя E. Полностью аналогичные рассуждения для «нижней» полусферы ($0 < \alpha < \pi$) дают следующий результат: – увеличение длины: $|\delta_1| > |\delta|$. При этом формула (23) остается верной.

Это означает, что происходит сокращение длины элемента дуги в верхней полуплоскости и увеличение элемента дуги в нижней. Коэффициент изменения определим как

$$k = 1 + \frac{\omega^2 \cdot a \cdot R \cdot \sin\alpha \cdot \sin\theta}{c^2} \tag{24}$$

при $0 < \alpha < \pi$ будет сокращение длины по сравнению с покоем и $k > 1$, при $\pi < \alpha < 0$ – увеличение длины – $k < 1$.

3) Применим полученный результат к описанию взаимодействия пробного тела – точка A – с зарядом (или массой), равномерно распределенной по сфере радиуса R. Рассчитаем «вертикальную» проекцию напряженности гравитационного поля, создаваемую «верхней» полусферой со сферическими координатами α, θ, R в точке A, движущейся по окружности радиуса a с центром в начале координат. Схема показана на рис. 5.

Напряженность поля притяжения, создаваемого элементом сферы, обозначим E_0. В системе отсчета вращающегося наблюдателя проекция E_0 на ось ординат определяется через сумму проекций от 2-х компонент напряженности (по движению элемента сферы и перпендикулярно ему)

$$E_{\uparrow} = -E_{\parallel}\sin(\varepsilon) + E_{\perp}\cos(\varepsilon), \tag{25}$$

где $E_{\parallel} = E_0\cos\gamma$ и $E_{\perp} = k \cdot E_0\sin\gamma$, k – коэффициент сокращения длины дуги, рассчитанный выше, E_0 – напряженность поля, создаваемая той же материальной точкой в случае, когда точка $\boldsymbol{A}$ неподвижна. Собирая вместе**,** получаем вертикальную проекцию напряженности поля как функцию α, θ, R:

$$E_{\uparrow} = E_0\left(\sin\alpha + \sin\gamma\cdot\cos(\gamma-\alpha)\cdot\frac{\omega^2\cdot a\cdot R\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta}{c^2}\right). \tag{26}$$

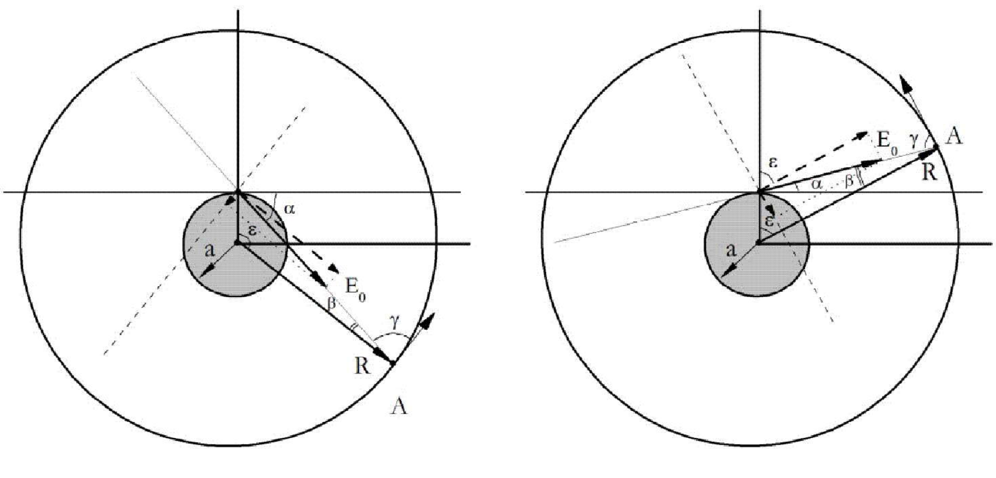

Рисунок 5. Схема для расчета напряженности поля.

Аналогичные выкладки для точки «нижней» полусферы согласно рис. 5 дают выражение:

$$E_{\downarrow} = E_0\left(-\sin\alpha + \sin\gamma\cdot\cos(\gamma-\alpha)\cdot\frac{\omega^2\cdot a\cdot R\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta}{c^2}\right). \tag{27}$$

Суммарная вертикальная проекция напряженности от симметричных элементов сферы равна:

$$E_{tot} = E_0\left(2\sin\gamma\cdot\cos(\gamma-\alpha)\cdot\frac{\omega^2\cdot a\cdot R\cdot\sin\alpha\cdot\sin\theta}{c^2}\right). \tag{28}$$

Для расчета полной напряженности от всей сферы выполним оценку в приближении $a << R$ и, соответственно, $\cos(\gamma - \alpha) \approx \sin(\alpha + \beta) \approx \sin\alpha$, $\sin\gamma \approx 1$. В этом приближении выражение (28) упрощается до

$$E_{tot} = E_0 \cdot \frac{2 \cdot \omega^2 \cdot a \cdot R \cdot \sin^2 \alpha \cdot \sin \theta}{c^2}, \tag{29}$$

что позволяет легко рассчитать полный интеграл.

Как для электростатического, так и для гравитационного взаимодействия выполняется закон обратных квадратов. Напряженность гравитационного поля E_0 в точке E равна

$$dE_0 = G\frac{\rho \cdot dV}{R^2}. \tag{30}$$

Интегрируя полученное выражение (29), получаем суммарную силу, действующую на единичную массу и направленную центробежно:

$$F = mE = \frac{2G\rho}{c^2} m\omega^2 a \int_a^{R_0} RdR \int_0^{\pi} \sin^2 \alpha d\alpha \int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta d\theta = \frac{\pi^2}{8} \frac{GR_0{}^2 \rho}{c^2} m\omega^2 a. \tag{31}$$

Центробежная сила, возникающая в неинерциальной системе, отсчета двигающейся равномерно по окружности, равна $F = m\omega^2 a$. Сравнивая выражения, мы находим безразмерный комплекс

$$C = \frac{\pi^2 G R_0^2 \rho}{8c^2} \sim 1. \tag{32}$$

Для современных оценок размера и плотности вещества во Вселенной (гравитационная постоянная $G = 6.67 \cdot 10^{-8}$ дин см^2/г^2, $R_0 = 9 \cdot 10^{28}$ см размер видимой Вселенной, среднюю плотность вещества порядка критической плотности $\rho_0 = 10^{-29}$ гсм$^{-3}$, и скорость света $c = 3 \cdot 10^{10}$ см/с) эта величина оказывается порядка 1–10. То, что данный комплекс оказался близким к единице, скорее можно рассматривать как совпадение, поскольку использованные оценки приближенные.

Итак, мы показали, что со стороны Вселенной на тело массы m, которое движется по окружности радиуса a с угловой скоростью ω, действует центробежная сила:

$$F \approx m\omega^2 a. \tag{33}$$

4. Заключение

В этой и предыдущих статьях предложен логически замкнутый подход к описанию релятивистских эффектов, не требующий аксиоматического постулирования требований принципа относительности и принципа независимости скорости света от движения источника и наблюдателя. Показано, что оба принципа могут быть получены с использованием логической схемы («приборного принципа»), в которой для передачи информации о событиях наблюдатель использует световые сигналы. Такой подход позволяет вывести кинематические эффекты, электродинамику и возникновение инертности в неинерциальных системах отсчета согласно принципу Маха. Рассмотрен парадокс, возникающий при сравнении наблюдений в двух инерциальных системах отсчета, где наблюдатели, придерживаясь предложенной схемы, используют световые и звуковые сигналы. Этот парадокс выводит на вопрос о существовании «выделенной системы отсчета». Потенциальный эксперимент обсуждается в работах [3] и [5]. Чтобы сделать предложенный подход замкнутым, необходимо вывести закон инерции для поступательного ускоренного движения, а также закон электромагнитной индукции, что будет представлено в следующей статье.

Литература

1. *Филиппов Л.И.* К вопросу о выводе преобразований принципа Лоренца. Физическое образование в вузах. – 2020. – Том 26, № 1. – С. 16–29.
2. *Филиппов Л.И.* Изложение специальной теории относительности на основе процессов измерения. Физическое образование в вузах. – 2020. – Том 26, № 3. – С. 84–101.
3. *L. Filippov.* «Heuristic Approach to Kinematics and Electrodynamics of Moving Bodies», World Journal of Mechanics, 6, 52 (2016).
4. *Филиппов Л.И.* Теория относительности на основе анализа процессов измерения. Часть 2: сила Лоренца. Физическое образование в вузах. – 2020. – Том 26, № 4. – С. 21–29.
5. *L. Filippov.* «On a Heuristic Point of View Concerning the Mechanics and Electrodynamics of Moving Bodies», World Journal of Mechanics, 2016, 6, 305 (2016).
6. *Ives H.E., Stilwell G.R.* «An experimental study of the rate of a moving atomic clock», Journal of the Optical Society of America 28, 215 (1938).
7. *E. Mach.* «Conservation of energy», Science of Mechanics, 1875.
8. *A. Einstein,* «Zur Elektrodynamik bewegter Korper», Annalen per Physik, 322, 891 (1905).
9. *A. Einstein,* «Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?», Annalen der Physik, 323, 639 (1905).
10. *C. Brans, R.H. Dicke,* «Mach's principle and a relativistic theory of gravitation», Physical review, 124, 925, (1961)
11. *R.H. Dicke,* «Mach's principle and a invariance under transformation units», Physical review, 125, 2163, (1962).

Sound Model and Mach’s Principle

L. I. Filippov, V. V. Klimenko

Lyceum «Physical-Technical High School», St. Petersburg, st. Khlopina, 6, 3A, 194021
Saint Petersburg Academic University, St. Petersburg, st. Khlopina, 6, 3A, 194021;
e-mail: slava.klimenko@gmail.com

Received January 12, 2022 PACS 03.30

We present a technique where the basic physical procedures of the special relativity – clock synchronization and measurement of lengths – are carried out based on signals, the speed of which is tied to the selected frame of reference («environment»). As an example, we consider a model in which observers use «sound waves» as a signal. There is a paradox of the apparent discrepancy between the model results and the standard Lorentz transformations. Additionally we discuss an application of this framework to the Mach’s principle.

Keywords: theory of relativity, measurement principle, Mach’s principle.

References

1. *L.I. Filippov,* “On the derivation of the Lorentz transformations”, Physics of Higher Education, 26 (1), 16-29, (2020).
2. *L.I. Filippov,* “Exposition of the special theory of relativity, based on the analysis of measurement processes”, Physics of Higher Education, 26 (3), 84-101, (2020).
3. *L. Filippov,* “Heuristic Approach to Kinematics and Electrodynamics of Moving Bodies”, World Journal of Mechanics, 6, 52 (2016).
4. *L.I. Filippov,* “The theory of relativity based on the analysis of measurement processes. Part 2: the Lorentz force”, Physics of Higher Education, 26 (4), 21-29, (2020).
5. *L. Filippov,* “On a Heuristic Point of View Concerning the Mechanics and Electrodynamics of Moving Bodies”, World Journal of Mechanics, 2016, 6, 305 (2016).
6. *Ives H.E., Stilwell G.R.* «An experimental study of the rate of a moving atomic clock», Journal of the Optical Society of America 28, 215 (1938).
7. *E. Mach,* “Conservation of energy”, Science of Mechanics, 1875.
8. *A. Einstein,* “Zur Elektrodynamik bewegter Korper”, Annalen per Physik, 322, 891 (1905).
9. A. Einstein, “Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig?”, Annalen der Physik, 323, 639 (1905).
10. *C. Brans, R.H. Dicke,* “Mach’s principle and a relativistic theory of gravitation”, Physical Review, 124, 925, (1961).
11. *R.H. Dicke,* “Mach’s principle and a invariance under transformation units”, Physical Review, 125, 2163, (1962).