

Физический механизм электромагнитной индукции и механической инерции

© Л.И. Филиппов,¹ В.В. Клименко,² С.Е. Боровиков³

¹ Лицей «Физико-техническая школа» Академический университет РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Университет Южной Каролины,
29201 Колумбия, Южная Каролина, США

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэроприборостроения,
190000 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: klimenkv@mailbox.sc.edu

Поступило в Редакцию 12 декабря 2024 г.

В окончательной редакции 5 ноября 2025 г.

Принято к публикации 10 ноября 2025 г.

Предложен единый физический механизм, описывающий возникновение электродвижущей силы в системах с различной конфигурацией — при изменении магнитного поля в системе и при движении контура. Показано, что в неинерциальной системе отсчета ускоренно движущейся частицы или частицы, приближающейся к линейному проводу, происходит нарушение симметрии в наблюдаемом распределении заряженных частиц в проводе. Механизм позволяет объяснить как классические случаи, так и известные исключения из правила потока. Дополнительно рассмотрена аналогия между электромагнитным и гравитационным взаимодействиями. Применение предложенного подхода к гравитационному взаимодействию приводит к обоснованию принципа Маха: инерция есть следствие гравитационного взаимодействия ускоряющегося тела со всеми массами Вселенной.

Ключевые слова: электродвижущая сила, гравитационное и электромагнитное взаимодействия, Вселенная.

DOI: 10.61011/JTF.2026.02.62278.458-24

Введение

Хорошо известно, что закон электромагнитной индукции Фарадея описывает величину электродвижущей силы (ЭДС) одинаковым образом независимо от причины изменения магнитного потока через контур: за счет изменения магнитного поля или за счет движения контура. Для объяснения правила в этих двух случаях используются совершенно разные явления: работа силы Лоренца ($\mathbf{v} \times \mathbf{B}$) — для движущегося контура — и возникновение вихревого электрического поля ($\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$) — для меняющегося поля.

Р. Фейнман писал об этом: «Обычно столь красивое обобщение оказывается исходящим из единого глубокого основополагающего принципа. Но в этом случае какого-либо особо глубокого принципа не видно. Мы должны воспринимать „правило“ как совместный эффект двух совершенно различных явлений» [1]. На сегодняшний день, ответ на этот вопрос остается неопределенным, по-видимому, во многом из-за фундаментальной роли уравнений Максвелла и силы Лоренца в классической физике.

Кроме того, в теории Дж. Максвелла нет описания механизма электромагнитного взаимодействия. Эта теория автоматически обобщила опытные данные М. Фарадея. Вопрос о природе новой сущности — вихревого поля — остался за рамками теории. Как, например, и вопрос о природе гравитации — за рамками закона всемирного

тяготения Ньютона. СТО ответила на вопрос о природе магнитного взаимодействия,¹ а ОТО стала основой теории гравитации. Работ, посвященных фундаментальному механизму, введенного Максвеллом вихревого электрического поля, в научной литературе найти не удалось.

В литературе есть несколько работ, касающиеся вопроса неоднозначности интерпретации закона электромагнитной индукции [3–12]. Например, в работах [5,8] закон Фарадея рассматривается с точки зрения принципа причинности, и авторы приводят различные аргументы, обсуждая причину возникновения ЭДС и вихревого электрического поля. В работе [9] закон электромагнитной индукции рассмотрен для системы точечных зарядов на круговой орбите и выведен явно для одночастичного случая с помощью усреднения выражения для полей с использованием потенциалов Лиенара–Вихерта. Однако в многочастичном случае задача усложняется, если учитывать электромагнитные взаимодействия между частицами. В работе [10] автор рассматривает вопрос о существовании ЭДС в отсутствие зарядов в движущемся контуре и приводит объяснение с использованием преобразования полей в различных системах отсчета.

В настоящей работе мы показываем, что возникновение ЭДС в обоих случаях можно объяснить одним механизмом, основанным на учете временной задержки

¹ В работе [2] Р. Фейнман писал, что „Мы бы еще хотели подчеркнуть, что явление магнетизма — это на самом деле чисто релятивистский эффект“.

прихода сигналов кулоновского взаимодействия между зарядами в контуре и системой зарядов в источнике магнитного поля („проводе с током“), вызванного конечностью скорости распространения взаимодействия. Подробно рассмотрен случай возникновения ЭДС для случая меняющегося поля.

Этот же подход в применении к гравитационному взаимодействию позволяет объяснить возникновение силы инерции в системе отсчета ускоренного тела за счет взаимодействия тела с телами Вселенной, тем самым дается обоснование принципу Маха.

1. Физический механизм электромагнитной индукции

1.1. Нарушение симметрии при движении с ускорением

Рассмотрим кулоновское взаимодействие покоящихся заряженных частиц в участке прямолинейного провода с пробной заряженной частицей, движущейся вдоль провода на некотором расстоянии R различным образом: 1 частица покоится, 2 частица движется равномерно, 3 и 4 — частица движется с постоянным ускорением и находится ниже на рисунке и выше на рисунке рассматриваемого участка провода соответственно, как показано на рис. 1. Покажем, что при переходе к неинерциальной системе отсчета ускоренно движущейся частицы возникает асимметрия в наблюдаемом распределении заряженных частиц в проводе. Причина изменения связана с конечностью скорости распространения сигнала, которая полагается постоянной и равной скорости света.

Распределение частиц в проводе можно описать с помощью мгновенного снимка „траекторий сигналов“,² приходящих к пробной частице в один и тот же момент времени. В системе отсчета провода все траектории — это прямые линии. В системе отсчета частиц 1 и 2 траектории — также прямые линии. Однако в системе отсчета ускоренно движущихся пробных частиц — 3, 4 — наблюдаемые траектории будут искривлены. За время движения сигналов от источника до наблюдателя наблюдатель сдвигается вдоль направления движения и принимает сигнал не под тем углом, под которым тот был испущен. В случае равномерного движения частицы 2 наблюдаемое частицей изменение траектории постоянно во времени. Если участок провода dl расположен „на снимке“ выше частицы 2, тогда наблюдатель в системе отсчета частицы 2 принимает сигнал от участка dl под углом, большим, чем исходный угол α (в момент старта сигнала). Если участок dl расположен ниже положения заряда (рис. 1), угол оказывается меньшим. Величину изменения угла можно оценить значением $\Delta\alpha \sim vt/R \sim v/c$, где t — время движения сигнала от участка провода к наблюдателю. Поскольку скорость

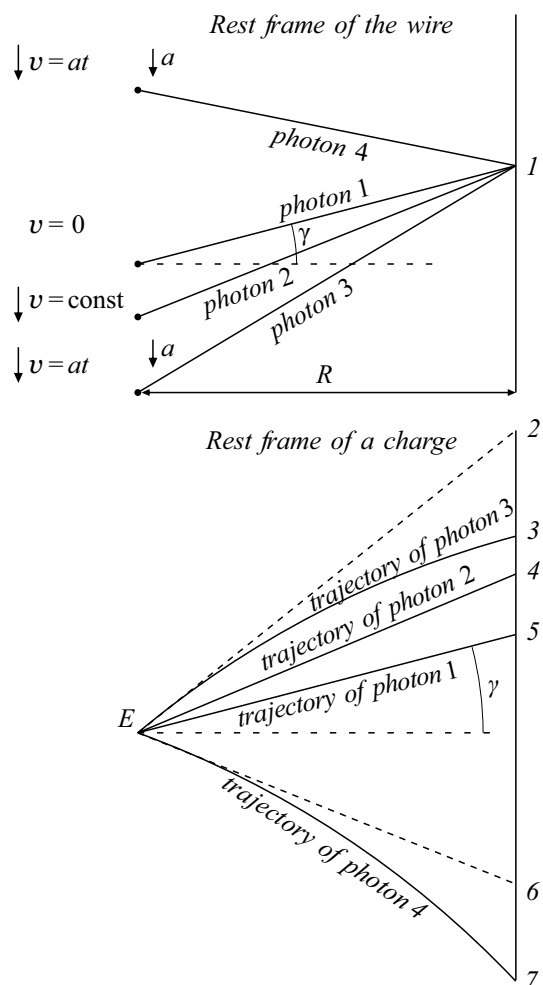


Рис. 1. Иллюстрация взаимодействия участка провода (I, „источник“) и зарядов в четырех различных системах отсчета. Верхняя панель показывает траектории сигналов взаимодействия („фотонов“) в системе отсчета (СО) провода. Заряд в первой СО покоится ($v = 0$), во второй СО — движется равномерно вдоль провода со скоростью $v = v_1$, в третьей и четвертой СО заряды движутся вдоль провода с постоянным ускорением a , $v = at$. На нижней панели показана та же ситуация с точки зрения СО 1–4: 2 — источник на снимке 3; 3 — момент старта фотона 3; 4 — источник на снимке 2 и момент старта фотона 2; 5 — источник на снимке 1 и момент старта фотона 1; 6 — источник на снимке 4; 7 — момент старта фотона 4.

постоянна, под прежним углом α наблюдатель 2 видит то же количество частиц на единицу длины провода, что и за время t до этого.

Значит, если в системе отсчета частицы 2 плотность электрического заряда в проводе постоянна, то проекции силы кулоновского притяжения зарядов в проводе к пробному заряду вдоль провода одинаковы по величине и противоположны по знаку для участков „выше“ и „ниже“ положения пробного заряда, а их сумма равна нулю (симметрия сохраняется).

² Траекторией сигнала называем путь, пройденный сигналом от момента старта до момента „достижения“ пробной частицы.

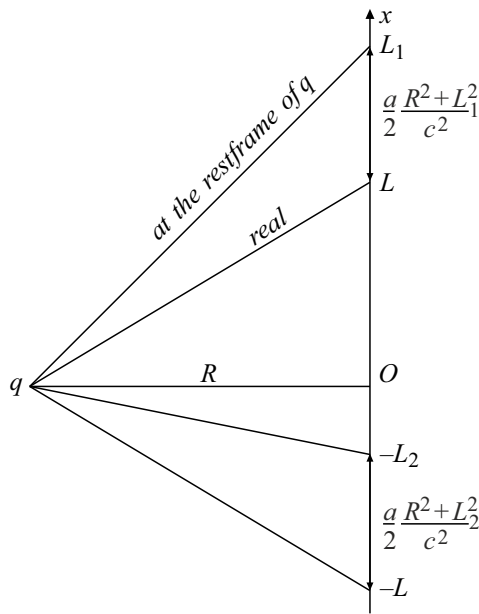


Рис. 2. Иллюстрация взаимодействия точечного (покоящегося) заряда q , с участком прямого провода $[-L, L]$, движущегося с постоянным ускорением a . Ситуация показана с точки зрения СО провода.

При движении с ускорением симметрия сил исчезает, изменение угла траекторий в системе отсчета пробного заряда меняется со временем, $\Delta\alpha \sim (v + at)/c$. В случае $a > 0$ угол наклона траекторий для участков провода, лежащих „на снимке“ выше и ниже положения наблюдателя, увеличивается и уменьшается соответственно по сравнению со значением, измеренным наблюдателем в предыдущий момент времени.

Рассчитаем „сжатие“ отрезка выше горизонтали „на снимке“ и „растяжение“ ниже горизонтали „на снимке“ по сравнению с ситуацией, когда $v = \text{const}$, для чего вычислим величину смещения точек „старта фотона“ (см. нижнюю панель рис. 1). Наблюдатель q видит весь провод как равноускоренно движущуюся прямую (рис. 2). Исходно симметричный отрезок $[-L, L]$ прямого провода в момент $t = 0$, мимо которого движется заряд q с ускорением a , в СО заряда q выглядит как отрезок $[-L_2, L_1]$, где расстояния $L_{1,2}$ определяются следующим уравнением:

$$L_{1,2} = L \pm \frac{at_{1,2}^2}{2}, \quad t_{1,2} = \frac{\sqrt{R^2 + L_{1,2}^2}}{c}. \quad (1)$$

Откуда находим

$$L_1 = \frac{c^2}{a} - \sqrt{\frac{c^4}{a^2} - \frac{2c^2}{a} \left(L + \frac{aR^2}{2c^2} \right)} \quad (2)$$

и

$$L_2 = -\frac{c^2}{a} + \sqrt{\frac{c^4}{a^2} - \frac{2c^2}{a} \left(\frac{aR^2}{2c^2} - L \right)}. \quad (3)$$

Полагая $at_{1,2}/c \ll 1$ малым параметром, получаем следующее выражение:

$$L_{1,2} = L \pm \frac{a}{2c^2} (L^2 + R^2), \quad (4)$$

где L_1 — отрезок выше положения системы отсчета заряда, L_2 — ниже. Таким образом, сигналы от симметричных участков провода приходят к наблюдателю в системе отсчета частицы под разными углами, соответствующими расстояниям $L_{1,2}$. Изменение угла меняет проекцию силы на ось в направлении провода, что создает асимметрию и возникновение эффективной силы.

Рассчитаем эту силу. Эта сила, направленная вдоль провода и вызванная полученной асимметрией, равна

$$F_x = \int_{-L_2}^{L_1} \frac{q\sigma x dx}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{q\sigma a L(L^2 + R^2/2)}{4\pi\epsilon_0 c^2 (L^2 + R^2)^{3/2}} \simeq \frac{q\sigma a}{4\pi\epsilon_0 c^2} \left(1 - \frac{R^2}{L^2} \right), \quad (5)$$

что при $L \gg R$ дает

$$F_x = \frac{1}{4\pi} \mu_0 \sigma q a, \quad (6)$$

так как $c^2 = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1}$. Таким образом, на покоящийся заряд со стороны ускоренных зарядов в проводе действует сила вдоль направления движения зарядов. Эта сила в случае притяжения пробного заряда и зарядов провода противоположна ускорению пробного заряда и в его системе отсчета выглядит так: ускоренно движущийся провод тянет пробный заряд за собой. Иначе говоря, возникает эффективная сила инерции. Это приводит к аналогии с силой гравитации (разд. 3 настоящей работы). При выводе формулы (6) не возникает надобность в учете абберации, так как она необходимым образом включена в логику вывода за счет учета изменения „направления луча“.

2. Электромагнитная индукция при различных вариантах изменения магнитного потока

Как известно, закон Фарадея выполняется в том числе в тех случаях, когда изменение магнитного потока является следствием механического движения контура или его частей. При этом появление ЭДС — результат действия на носители заряда силы Лоренца. Двигается ли при этом весь контур как целое, или эффективная площадь контура изменяется за счет его вращения или деформации — во всех случаях работа по переносу единичного заряда против силы Лоренца численно равна $-d\Phi/dt$. В то же время механизм возникновения ЭДС индукции в неподвижном контуре в поле изменяющегося

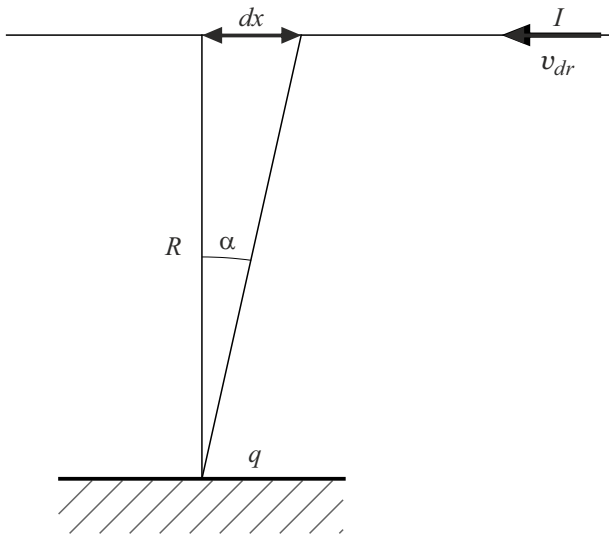


Рис. 3. Иллюстрация взаимодействия заряда и провода с током.

тока — т.е. та сила, без воздействия которой на носители заряда работа совершаться не может — в теории Максвелла возникает не как проявление взаимодействия пробного заряда с зарядами — источниками поля, а как действие на пробный заряд вихревого электрического поля, силовые линии которого не заканчиваются на зарядах, а замкнуты. Это поле вводится как новая сущность — следствие изменения во времени векторного потенциала, генерируемого движущимися зарядами провода. Без такой новой сущности объяснить возникновение ЭДС индукции в данном случае невозможно: не будет причины появления силы, действующей на частицы в рамке.

В работе [13] показано, что применение логики, кратко описанной выше („приборного принципа“), к взаимодействию зарядов в проводе с током и пробной частицы позволяет строго вывести классические формулы для силы Лоренца во всех случаях, когда частица движется параллельно току. Чтобы применить ту же логику к случаю перпендикулярного движения, вернемся к сказанному во введении.

2.1. Электромагнитная индукция при постоянном магнитном потоке и изменяющемся контуре

Докажем, что „приборный принцип“ объединяет два якобы различных явления: „контур движется“ и „поле меняется“.

Итак, пусть ток в длинном проводе будет постоянным, а форма контура изменяется: отрезок l движется к проводу. Рассмотрим ситуацию, в которой пробный заряд q движется перпендикулярно току $I = \text{const}$ со скоростью $v_1 = \text{const}$. В системе отсчета заряда q это приводит к такому же результату в изменении „траекторий фотонов“, как если бы скорость носителей заряда в

проводе росла (если v_1 направлена к проводу). Покажем это. Согласно схеме на верхней панели рис. 1, если за время движения сигнала от „источника“ к наблюдателю E (движущемуся с $v = \text{const}$ вниз, т.е. в ситуации „фотон 2“) наблюдатель успевает сдвинуться вправо, то „траектория“, продленная наблюдателем E , покажет не точку истинного старта „фотона“, а смещенную точку — в точности так же, как если бы скорость E возрастала, а „источник“ был неподвижен. Проще говоря, ускорение и сближение одинаково увеличивают угловую скорость носителей тока в проводе с точки зрения СО пробного заряда q (рис. 3). Математически это может быть описано следующим образом:

1) Ситуация, когда симметрия и изотропия не нарушаются (траектории не искривлены) — равномерное движение ($v_{dr} = \text{const}$; $R = \text{const}$; $h = \text{const}$) (рис. 3):

$$v_{dr} = \frac{dx}{dt}; \quad \text{tg}(d\alpha) = \frac{dx}{R}, \quad d\alpha/dt \approx \frac{v_{dr}}{R}, \quad (7)$$

угол α мал.

2) Растет ток. Движение с ускорением. ($dI/dt = \sigma a$; $R = \text{const}$; $dv_{dr}/dt = a$):

$$d\alpha_1 = \frac{1}{R} \left(v_{dr} dt + \frac{dv_{dr}}{dt} \frac{dt^2}{2} \right). \quad (8)$$

3) $I = \text{const}$; частица и провод сближаются, $v_1 = -R'_t$; $v_{dr} = \text{const}$; $v_1 dt \ll R$:

$$d\alpha_2 = \frac{v_{dr} dt}{R - v_1 dt} \simeq \frac{v_{dr} dt}{R} \left(1 + \frac{v_1 dt}{R} \right). \quad (9)$$

Наша задача сделать ситуации (8) и (9) идентичными для СО заряда q (т.е. $d\alpha_1 = d\alpha_2$). Приравниваем (8) и (9), и получаем:

$$a = \frac{2v_1 v_{dr}}{R}. \quad (10)$$

Итак, если предложенная теория — „приборный принцип“ — верна, то приближение пробного заряда к проводу с постоянным током $I = v_{dr} \sigma$ со скоростью v_1 должно привести к такому же физическому результату, как ускорение частиц провода, равное a , при условии соотношения между ускорением и v_1 , соответствующим (10).

На заряд, движущийся перпендикулярно длинному прямому проводу с током, действует сила Лоренца. При выполнении соотношения (10) между ситуацией „рост тока в проводе; неподвижный заряд“ и ситуацией „постоянный ток в проводе; заряд движется к проводу“, формула для силы (6) должна преобразоваться в классическую формулу для силы Лоренца. Убедимся, что это верно, т.е. в том, что соблюдается „принцип соответствия“.

При движении частицы к проводу со скоростью v_1 на нее должна действовать сила, направленная вдоль провода (подставляем (10) в (6)):

$$F_x = \frac{1}{2\pi} \mu_0 \sigma q \frac{v_1 v_{dr}}{R} \quad (11)$$

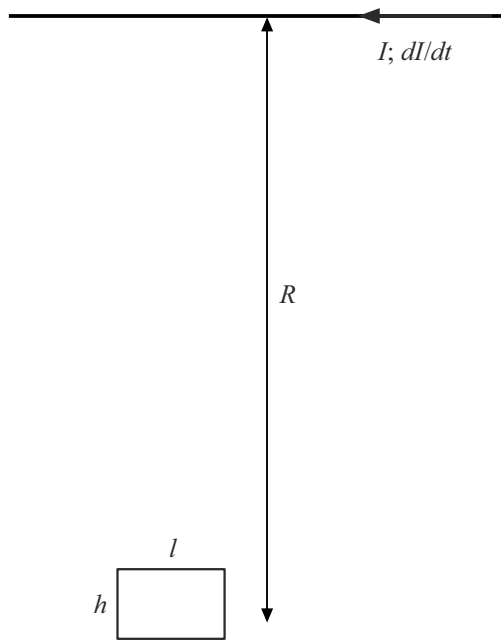


Рис. 4. Иллюстрация взаимодействия замкнутого прямоугольного контура $h \times l$ и длинного прямого провода с током I .

и, так как $\sigma v_{dr} = I$, получаем

$$F_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} qv_1 \quad (12)$$

— классическую формулу силы Лоренца.

Итак, принцип соответствия в данном варианте взаимодействия соблюден.

Этот результат ожидаем, поскольку природа силы Лоренца и силы F_x , выведенной выше как эффект ускорения тока, одна и та же — кулоновское взаимодействие плюс запаздывание сигнала (см. [13]).

Однако между силой F_x из формулы (6) и силой Лоренца есть принципиальное различие: сила F_x не зависит от расстояния между частицей и проводом R . Это объясняется тем, что увеличение R в случае „рост тока и неподвижная частица“, хотя и уменьшает кулоновскую силу, но при этом во столько же раз увеличивает число частиц длинного провода, попадающих в заданный угол обзора, что и делает интеграл (5) не зависящим от R при $L \gg R$. А в случае „постоянный ток и движущаяся к проводу частица“ увеличение R и приводит к еще одному эффекту: уменьшается кажущееся ускорение частиц провода. Математически это выражается в формулах (8) и (9): зависимость производной малого угла по времени от R для ситуации „рост тока“ обратная, а для ситуации „движение частицы“ — обратноквадратичная.

Из сказанного выше следует качественно важный вывод. При движении рамки с током как целого, как и при движении одного ее плеча к проводу (плечо l) или вдоль него (плечо h , рис. 4) сила Лоренца приводит к возникновению в рамке ϵ_{ind} , равной работе F_L по переносу единичного заряда по всему контуру, и эта ϵ_{ind}

оказывается равной по модулю $d\Phi/dt$:

$$\Phi = BS = \frac{\mu_0}{2\pi} Ilh \frac{1}{R}. \quad (13)$$

Случай 1. Двигается вся рамка ($v_1 = dR/dt$):

$$\left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| \frac{\mu_0}{2\pi} Ilh \frac{d(1/R)}{dt} \right| = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{v_1}{R^2} lh = A_{FL}. \quad (14)$$

Случай 2. Двигается плечо рамки, параллельное току ($v_1 = dh/dt$):

$$\left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| \frac{\mu_0}{2\pi} Il \frac{1}{R} \frac{dh}{dt} \right| = \frac{\mu_0 I}{2\pi} l \frac{v_1}{R} lh = A_{FL}. \quad (15)$$

Случай 3. Двигается плечо рамки, перпендикулярное току ($v_1 = dl/dt$):

$$\left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| \frac{\mu_0}{2\pi} Ih \frac{1}{R} \frac{dl}{dt} \right| = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{v_1}{R} h = A_{FL}. \quad (16)$$

Как мы видим, во всех трех случаях ((14), (15) и (16)) ЭДС индукции оказывается равной работе силы Лоренца по переносу единичного заряда по всему контуру.

2.2. Случай неподвижного контура и изменяющегося магнитного потока

По теории Максвелла („правило потока“) в ситуации, когда h , l и R постоянны (рамка не меняет свое положение относительно провода и не деформируется), ЭДС в рамке должна появиться не за счет силы Лоренца, а за счет изменения величины тока в проводе.

Случай 4. Итак, ничто не движется:

$$\left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = \left| \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{lh}{R} \frac{dI}{dt} \right|. \quad (17)$$

Однако в этом случае сила Лоренца отсутствует — ни одна часть рамки не движется. А сила F_x из формулы (6), как показано выше, от R не зависит (в отличие от F_L в случае движения всей рамки), а значит, при переносе заряда по контуру рамки суммарная работа этой силы равна нулю. То есть теория „приборного принципа“ не может дать объяснение механизму возникновения силы, отвечающей за ЭДС в неподвижном контуре, находящемся в поле длинного прямого провода с изменяющимся током. ЭДС в таком случае возникать не должна (при условии, что размеры контура много меньше расстояния до провода, а длина провода много больше этого расстояния).

Противоречит ли такой вывод результатам опытов Фарадея? Нет, ибо в этих опытах рост тока в одном из соосных соленоидов приводит к тому же результату, что и сближение соленоида с постоянным током и пробного соленоида: в пробном соленоиде возникает ϵ_{ind} , равная $d\Phi/dt$. Но в опытах Фарадея шла речь только о параллельных проводах, в одном из которых растет ток, т.е. ЭДС возникала благодаря действию силы F_x

вдоль провода. Прямое применение данного опыта — трансформатор и соленоиды с общим сердечником. Сказанное верно, если верна приведенная выше логика, и если понятие „вихревое электромагнитное поле“ — т. е. поле без зарядов — рассматривать как удобную для теории абстракцию, а не реальную силу — следствие кулоновского взаимодействия.

2.3. К вопросу об экспериментальной проверке теории

Утверждение, что из правила потока есть еще одно исключение, т. е. закон электромагнитной индукции Фарадея не выполняется в таком простом случае — неподвижный контур в магнитном поле длинного прямого провода с меняющимся током — звучит слишком парадоксально и требует опытного подтверждения. Упоминание о подобных экспериментах в литературе найти не удалось. Для такого опыта нужна довольно громоздкая установка, чувствительный регистрирующий прибор и большие величины быстроменяющегося тока. Чтобы подтвердить справедливость закона $\varepsilon = -d\Phi/dt$ вполне достаточно было опытов с соосными соленоидами. Для проверки описанного выше предсказания теории „приборного принципа“ нами были проведены шесть серий экспериментов, которые дали следующие стабильные результаты: вблизи длинного прямого провода с быстроменяющимся током (разд. 2.2, случай 4) при $L \gg R$ ЭДС индукции в рамке-магнитометре многократно (более чем в 25 раз) меньше значения, вычисленного по формуле классической электродинамики (17). Рассматривать эти эксперименты как строгое подтверждение справедливости теории „приборного принципа“, конечно, нельзя. Однако предварительный вывод, по нашему мнению, сделать можно. А именно случай неподвижного контура в поле длинного прямого провода — одно из исключений из „правила потока“, как и другие, описанные в литературе. Эти исключения непротиворечиво объясняются логикой приборного принципа (разд. 4 настоящей работы)³.

Кроме описанных выше, нами были проведены расчеты для случая более сложной конфигурации, непосредственно совпадающей с опытами Фарадея: возникновение ЭДС индукции в одном из круговых контуров как результат роста величины тока в другом. Расчеты проведены в двух случаях: 1) концентрические кольцевые контуры, расстояние между которыми много меньше их радиуса; 2) соосные кольца одного диаметра, расположенные в параллельных плоскостях. Расчеты по формулам теории Максвелла и по теории „приборного принципа“ (работа силы из формулы (6)) приводят к совпадению результатов.

Итак, правило потока допускает исключения, а такое понятие, как вектор магнитной индукции, является эффективной величиной, которая позволяет красиво и на-

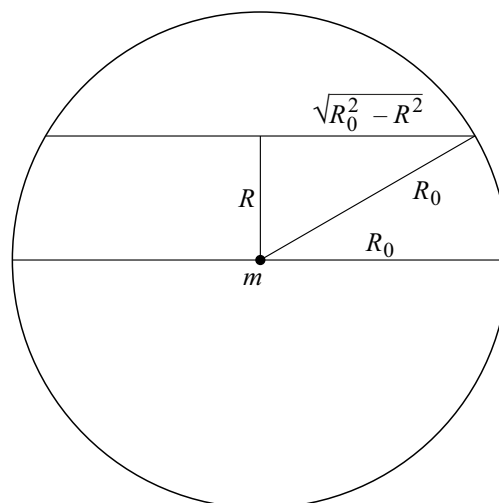


Рис. 5. Схема расчета гравитационного взаимодействия тела с окружающими телами (в случае цилиндрической системы координат).

глядно описывать физические явления, тогда как точный расчет с учетом запаздывания сигналов кулоновского взаимодействия оказывается сложным, но приводит к такому же результату. Однако, что представляется более важным, основополагающий принцип возникновения эффекта электромагнитной индукции — это запаздывание сигналов электромагнитного взаимодействия. Гипотетически, если бы скорость сигналов была бесконечной, явления магнетизма (см. [14,15]) и электромагнитной индукции отсутствовали бы.

3. Принцип Маха: сила инерции как следствие запаздывания гравитационного сигнала

Предложенный механизм возникновения электромагнитной индукции можно применить к системе частиц с гравитационным взаимодействием. Действительно, в рамках этой логики кулоновское взаимодействие электрических зарядов чисто математически не отличается от гравитационного притяжения между массивными частицами.

Рассмотрим взаимодействие ускоренно движущейся точечной массы m с другими телами в системе, окружающими точечную массу и распределенными сферически симметрично с плотностью ρ . В центре сферы радиуса R_0 расположено тело массой m , движущееся с ускорением a вдоль оси цилиндра. Чтобы построить аналогию с главой 1, рассмотрим заполнение шара радиуса R_0 цилиндрическими оболочками („линиями“) длиной $L = \sqrt{R_0^2 - R^2}$, где R — расстояние оболочки от центра. Иллюстрация приведена на рис. 5. В такой геометрии логика полностью совпадает со схемой на рис. 2 — другие тела, расположенные вдоль оси цилиндра, соответ-

³ Подробное описание экспериментов будет опубликовано в отдельной статье.

ствуют носителям заряда в проводе. Элемент цилиндра $dV = dx dR 2\pi R$ обладает массой ρdV . По аналогии с логической схемой в разд. 1, согласно выражению (6), со стороны других тел в цилиндрической оболочке на пробное тело возникает сила F_x , направленная противоположно ускорению.

Проведем эту аналогию (вся логика вывода формулы (6) та же):

$$F_x = \frac{1}{4\pi} \mu_0 \sigma q a; \quad \frac{\mu_0}{4\pi} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0 c^2} \quad (18)$$

и

$$F_{\text{grav}} = G \frac{m \rho dV}{r^2}; \quad dV = dx dR 2\pi R. \quad (19)$$

Значит, в случае для одной цилиндрической оболочки $L \gg R$:

$$dF_{x,\text{grav}} = \frac{G}{c^2} \rho m a 2\pi R dR, \quad (20)$$

где dR — малая толщина цилиндрической оболочки, R — ее радиус. И, заполняя Вселенную до ее радиуса R_0 (в предположении, что средняя плотность постоянна):

$$F_{x,\text{grav}} = \frac{2\pi G \rho m a}{c^2} \int_0^{R_0} R dR, \quad (21)$$

$$F_x = \frac{G \rho R_0^2 \pi}{c^2} m a = k m a. \quad (22)$$

Если использовать современные оценки средней плотности вещества (энергии) во Вселенной: 10^{-27} kg/m^3 , и радиуса Вселенной $8.8 \cdot 10^{26} \text{ m}$, $G = 6.67 \cdot 10^{-11}$, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, то коэффициент k согласуется с единицей с учетом точности оценок. В этом случае выражение (22) соответствует силе инерции $F = m a$ в неинерциальной системе отсчета, связанной с частицей.

Таким образом, описанный механизм объясняет возникновение инерции тела при ускоренном движении за счет взаимодействия тела со всеми массами Вселенной и конечности скорости распространения этого взаимодействия, что приводит к искривлению траекторий. Этот принцип был сформулирован Эрнстом Махом так: инерция обусловлена взаимодействием с ускоренной массой всей Вселенной (см, например, [16]). Ускоряется ли само тело и Вселенная „тормозит“ его своей гравитацией, или ускоряющаяся Вселенная „тянет“ тело за собой — разницы с точки зрения системы отсчета тела нет. Рассматривая инерцию как следствие гравитации, Мах дал обоснование эквивалентности „двух видов“ массы. Тем самым в соответствии с принципом Оккама, вместо двух якобы различных сущностей остается одна.

3.1. Безразмерный комплекс

Анализ литературы показал, что безразмерный комплекс в выражении (22) был получен ранее в работах [17–19] в другой логике. Авторы рассмотрели принцип эквивалентности Эйнштейна для модели „тестового

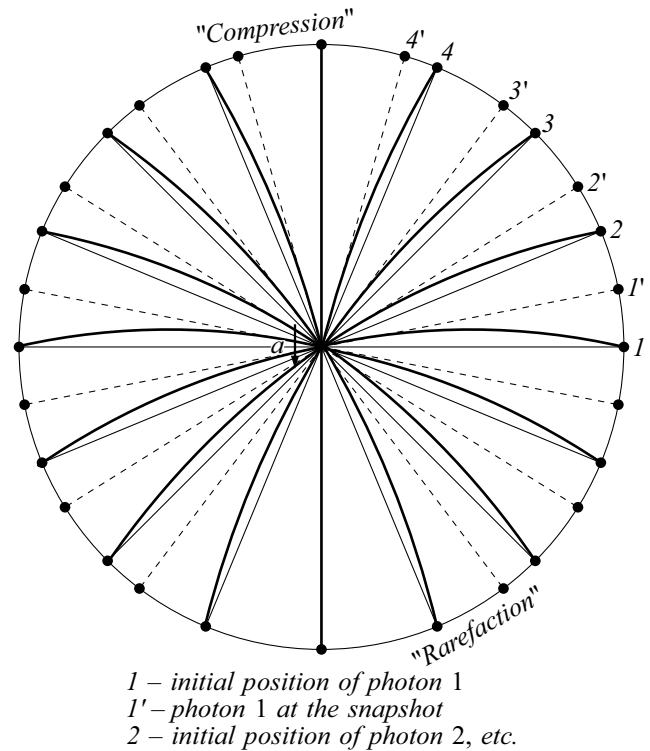


Рис. 6. Рисунок, иллюстрирующий картину искривленных траекторий для случая линейного ускорения. Аналогичен схеме, приведенной на нижней панели рис. 1. Все точки сферы смещены вверх от реального положения. Точки с номерами и соответствующие точки со штрихами обозначают точку старта фотонов и видимое положение на „снимке“. Ситуация для случая центростремительного ускорения вполне аналогична данному рисунку — с той лишь разницей, что точка пробного тела смещена от центра сферы на величину радиуса вращения, который при интегрировании становится исчезающе малым.

тела“, свободно падающего на Солнце, и из соображений размерности получили следующее условие: безразмерный комплекс $\frac{GM}{R_0 c^2}$, где M — масса Вселенной, должен быть порядка единицы. Положив $M = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho$, получаем совпадение порядка данного комплекса с найденным нами коэффициентом.

Также можно заметить, что, зная соотношение инертной и гравитационной масс и измерив среднюю (локальную) плотность вещества/энергии в пространстве, можно сделать оценку эффективного радиуса Вселенной (в рамках рассматриваемой модели) и показать конечность этой величины.

3.2. Замечание о локальности искривления траекторий

Здесь следует сделать важное замечание. Рассуждение о различном сжатии отрезков на „мгновенном снимке“ в ускоряющейся системе отсчета остается корректным лишь в малых масштабах. Эта логика описывает изменение именно *угловых* размеров — и только в этом

смысле следует понимать термин „сжатие“. Роль играет только изменение угла из-за искривления воображаемых траекторий вблизи положения пробной частицы. Тот факт, что информация с больших расстояний доходит до тела за время порядка млрд. лет, в процессе вывода формулы роли не играет. Подобно тому, как линза телескопа искривляет лучи света одинаково, независимо от того, что она появилась на их пути через миллиарды лет после момента их „старта“, ускорение тела искривляет геодезические „силовых линий“ Вселенной локально, приводя к их сгущению по одну сторону от тела — и к силе инерции соответственно. Графически сказанное можно проиллюстрировать так, как показано на рис. 6. В направлении, противоположном ускорению, происходит *видимое* сгущение силовых линий с точки зрения частицы и наоборот — разрежение в направлении движения. В результате возникает эффективная сила в направлении, противоположном ускорению частицы.

Модель, эквивалентно описывающая рассмотренную ситуацию, такова: масса всех тел, воздействующих на пробное тело, сосредоточена в близкой цилиндрической оболочке (с поправкой на расстояние), размеры которой таковы, что носители взаимодействия успевают достичь пробного тела за то время, когда оно движется ускоренно (кроме того, выполняется условие $\frac{a\sqrt{R^2+L^2}}{c^2} \ll 1$). Только в этот промежуток времени и происходит искривление силовых линий в системе отсчета пробного тела. До момента начала ускорения эти линии были прямыми в этой системе отсчета.

3.3. Сравнение эффекта учета задержки сигнала в случаях гравитационного и кулоновского взаимодействий

Гравитационное взаимодействие, в отличие от кулоновского, описывает только притяжение тел. Это приводит к тому, что сила инерции всегда выполняет роль отрицательной обратной связи: внешнее воздействие, стремящееся изменить скорость тела, приводит к росту силы инерции. Аналогично происходит взаимодействие ускоряющегося заряда с носителями заряда в параллельном проводе, однако одноименные электрические заряды отталкиваются. Поэтому в случае гравитации ситуация такова: Вселенная, ускораясь, тянет массивное тело за собой — так выглядит сила инерции из неинерциальной системы отсчета ускоряющегося тела. В случае электродинамики ситуация иная: в одном из параллельных проводов ускорятся электроны, в результате в другом проводе возникает ЭДС, разгоняющая легкие носители в нем в противоположную сторону (правило Ленца); в случае соленоида это срабатывает как инерция (индуктивность).

Из этого можно сделать интересный вывод: для гипотетической частицы, обладающей свойством антигравитации, взаимодействие с остальными телами Вселенной имело бы характер положительной обратной связи: ускорение такого тела приводило бы к еще большему

росту скорости. Соответственно равновесие в состоянии покоя было бы неустойчивым. В случае взаимодействия электрических зарядов подобный эффект не возникает из-за электронейтральности среды в среднем.

Одиночный заряд, помещенный в сплошную среду с одноименным зарядом (например, в достаточно длинный и узкий промежуток между заряженными одноименно плоскостями) будет иметь большее ускорение, чем при прочих равных условиях в отсутствие заряда на плоскостях. Если заряд на пластинах противоположен по знаку заряду частицы, инерция частицы будет больше обычной.

3.4. Случай ускоренного движения при вращении тела

В случае движения с центростремительным ускорением применение теории „приборного принципа“ и закона всемирного тяготения к телу массы m должно описать возникновение центробежной силы в неинерциальной СО:

$$F_{\text{centr}} = m\omega^2 r, \quad (23)$$

где r — радиус окружности и ω — угловая скорость. В работе [20] мы рассмотрели похожую модель, учитывая запаздывание времени прихода сигнала от верхней и нижней полусфер при смещении траектории движущейся частицы, что эффективно приводило к перераспределению наблюдаемой массы в системе отсчета частицы. Полученное выражение для эффективной силы пропорционально выражению для центробежной силы, а коэффициент пропорциональности содержит тот же безразмерный комплекс, как в выражении (20).

4. Исключения из „правила потока“

В литературе описаны несколько исключений из „правила потока“, когда классическая теория не может описать опытные результаты. Мы приведем два примера из курса „Фейнмановские лекции по физике“⁴ и покажем, что они объясняются механизмом, основанном на учете запаздывания сигналов.

В первом примере изменение магнитного потока через контур равно нулю, в то время как ЭДС индукции отлична от нуля. В этом опыте перпендикулярно плоскости вращающегося медного диска магнит создает магнитное поле; ток возникает между осью, на которой вращается диск, и щеткой, скользящей по его ободу. Частицы медного диска, включая электроны проводимости, движутся по окружностям. Пересекая зону магнитного поля, эти электроны оказываются под действием силы Лоренца: сонаправленные токи (ток в обмотке магнита и ток, вызванный движением диска) притягиваются, противоположенные — отталкиваются (см. [15]). В данном случае причина возникновения ЭДС — кулоновское

⁴ „Фейнмановские лекции по физике“, том 6, гл. 17, пп. 2, 4.

взаимодействие и „приборный принцип“, а следствие — ЭДС в контуре „ось диска — его обод“.

Во втором примере следование правилу потока приводит к парадоксу. Этот пример наиболее ярко демонстрирует условность таких искусственно введенных понятий теории Максвелла, как вихревое электрическое поле, принципиально отличающееся от поля Кулона тем, что его линии замкнуты, а не исходят из точечных зарядов. Вихревое поле необходимо, чтобы уравнения Максвелла стали симметричными, и это дополнение (как и „ток смещения“) позволило сделать уравнения грациозными и лоренц-инвариантными, что, в свою очередь, привело к рождению теории относительности.

На легком горизонтальном диске, свободно вращающемся вокруг вертикальной оси, имеется катушка — короткий соленоид с собственным источником тока, концентрический по отношению к оси вращения. В момент включения тока возникает быстро растущее магнитное поле, а значит, по теории Максвелла, и вихревое электрическое. По окружности на краю диска на равных расстояниях размещены заряженные металлические шарики, изолированные друг от друга диэлектриком, из которого изготовлен диск. В момент включения тока (как и в момент выключения) вихревое электрическое поле должно оказывать на каждый шарик силовое воздействие, касательное к окружности диска, т.е. диск, согласно теории, должен начать вращаться (при включении тока в одну сторону, при выключении — в другую), если до этого он покоился.

То есть все произойдет в точности так, как если бы по ободу диска в момент включения тока начали двигаться объекты, обладающие массой (а в момент выключения они бы затормозили). Эти движущиеся массивные объекты обладают реальным моментом импульса, что и приводит в итоге к соблюдению закона его сохранения: в сумме момент импульса диска и этих объектов остается все время нулевым. Чтобы закон сохранения выполнялся, придется приписать магнитному полю реальный момент импульса. Но в таком случае пришлось бы отказаться от объяснения магнетизма как релятивистского эффекта закона Кулона. А наличие у магнитного поля импульса без массы привело бы еще к многим вымышленным парадоксам.

Объяснение опыта с помощью кулоновских сил и запаздывания сигналов никаких парадоксов не вызывает. Включение тока приводит к круговому движению носителей заряда в проводах соленоида, но их масса и скорость дрейфа вызывает момент импульса, на много порядков меньший, чем тот, что приписывается полю. Кроме того, наличие момента импульса у поля в описанном примере зависит от наличия зарядов на ободу диска, а эти заряды легко заставить исчезнуть в процессе вращения, стоит лишь замкнуть их на расположенный в центре заряд противоположного знака. Взаимодействие растущего (или убывающего) тока в соленоиде с зарядами на ободу диска реально — и оно, как показано выше,

объясняется кулоновским взаимодействием и „приборным принципом“. Однако никакого нарушения закона сохранения момента импульса это взаимодействие не вызывает, ибо сила действия со стороны проводов на заряды равна силе действия зарядов на провод.

Введение новой сущности — электрического поля без зарядов, а также приписывание магнитному полю момента импульса, зависящего от наличия в системе заряженных тел, приводит к возникновению парадоксов, нарушающих законы сохранения.

В данном случае замкнутая система (диск, соленоид с источником тока, заряженные шарики на диске), приходящая в движение без воздействия внешних сил, представляла бы собой пример „эффекта Мюнхгаузена“. Очевидным вариантом практического использования подобной конструкции была бы система ориентации космических аппаратов. Разумеется, закон сохранения момента импульса верен, и диск вращаться не будет.

Заключение

Информацию о физических явлениях во Вселенной переносит электромагнитное взаимодействие. Скорость его конечна, и более быстрого сигнала не существует. По-видимому, конечность скорости сигнала и задержка прихода сигналов от источника к наблюдателю является причиной релятивистских явлений как в кинематике, так и в электродинамике. Точное рассмотрение процессов измерения с учетом конечности скорости света в вакууме позволяет объяснить эффекты специальной теории относительности и строго вывести ее законы: принцип постоянства скорости света, преобразования Лоренца и следствия из них, в том числе силу Лоренца как результат кулоновского взаимодействия и механического движения. В работах [13–15,20] были детально рассмотрены эти вопросы. Именно факт конечности скорости передачи информации посредством электромагнитных волн делает скорость света выделенной мировой константой. Решающую роль в релятивистских эффектах играет объект, переносящий информацию в виде взаимодействия, т.е. по сути, „измерительный прибор“. Если бы скорость света была бесконечной, то не было бы не только кинематических эффектов СТО, но и магнетизма — дополнительного взаимодействия движущихся заряженных тел.

Похожие результаты были обнаружены в исследованиях поведения солитонов в твердых телах (см., например, [21]). Авторы показали, что „релятивистские“ эффекты описываются формулами специальной теории относительности, в которых скорость света заменена на скорость звука. Среди них — лоренцево сокращение ширины движущегося солитона, лоренцева зависимость энергии солитона от его скорости, соотношение эквивалентности массы и энергии покоя, аннигиляция солитона и антисолитона с излучением энергии в виде звуковых

волн. Это означает, что причина релятивистских эффектов та же самая, однако роль переносчика информации для солитонов играют звуковые волны. Теоретически данное физическое явление независимо описано в работе [20], раздел „звуковая модель“.

Мы показали, что единый принцип — учет задержки сигнала кулоновского взаимодействия и изменение траекторий — позволяет описать эффект электромагнитной индукции в обоих случаях его проявления. Разумеется, для описания всех видов электромагнитного излучения, этого недостаточно. Тем не менее само понятие „поле“ основывается именно на запаздывании сигнала — на „теории близкодействия“. И важно не забывать, что речь идет о кулоновском взаимодействии. Рассматриваемые в классическом подходе „взаимно поддерживающие“ вихревые поля — электрическое и магнитное, — составляющие электромагнитную волну, помогают объяснить и понять многие электромагнитные явления. И все же следует постоянно помнить об отличии реальных взаимодействий от необходимых для полноты теории понятий — вихревых полей и токов смещения. Иначе это может привести к созданию гипотез *ad hoc* — и связанных с ними парадоксов.

Будучи примененным к гравитационному взаимодействию этот же принцип позволяет объяснить возникновение силы инерции в неинерциальной системе отсчета как следствие взаимодействия с другими телами во Вселенной, т. е. обосновать принцип Маха. Все это позволяет объединить единым физическим принципом явления, которые рассматривались как независимые сущности.

Благодарности

Авторы благодарны Е. Михайлову за помощь в подготовке публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. *Фейнмановские лекции по физике, т. 7. Электродинамика* (Мир, М., 1977)
- [2] Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. *Фейнмановские лекции по физике, т. 5. Электричество и магнетизм* (Мир, М., 1977)
- [3] E.J. Marx. *Franklin Inst.*, **300**, 353 (1975).
- [4] G. Ares-de-Parga, M. A. Rosales. *Eur. J. Phys.*, **10**, 74 (1989). DOI: 10.1088/0143-0807/10/1/117
- [5] O.D. Jefimenko. *Eur. J. Phys.*, **25**, 287 (2004). DOI: 10.1088/0143-0807/25/2/015
- [6] J. Dunning-Davies. *Progress Phys.*, **1**, 48 (2005). DOI: 10.48550/arXiv.physics/0406056
- [7] A.L. Kholmetskii, O.V. Missevitch, T. Yarman. *Eur. J. Phys.* **25**, 287 (2005). DOI: 10.48550/arXiv.physics/0504223
- [8] C. Savage. *Ph. Teacher*, **50**, 226 (2012). DOI: 10.1119/1.3694075
- [9] T.H. Boyer. *American J. Phys.*, **83**, 263 (2015). DOI: 10.1119/1.4901191
- [10] S.G. Fedosin. *Progress In Electromagnetics Research C*, **96**, 109 (2019). DOI: 10.2528/PIERC19062902
- [11] P. Kinsler. *Physics*, **2**, 148 (2020). DOI: 10.3390/physics2020009
- [12] G. Giuliani. *Am. J. Phys.*, **91**, 278 (2023). DOI: 10.1119/5.0138144
- [13] Л.И. Филиппов. *Физическое образование в вузах*, **4**, 21 (2020). DOI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43003700>
- [14] Л.И. Филиппов. *Физическое образование в вузах*, **1**, 16 (2020). DOI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43003700>
- [15] Л.И. Филиппов. *Физическое образование в вузах*, **3**, 84 (2020). DOI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44234279>
- [16] С. Вейнберг. *Гравитация и космология* (Мир, М., 1975)
- [17] R.H. Dicke. *Rev. Modern Phys.*, **29**, 363 (1957). DOI: <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.29.363>
- [18] R.H. Dicke. *Science*, **129**, 621 (1959). DOI: <https://doi.org/10.1126/science.129.3349.621>
- [19] D.W. Sciama. *MNRAS*, **113**, 34 (1953). DOI: 10.1093/mnras/113.1.34
- [20] Л.И. Филиппов, В.В. Клименко. *Физическое образование в вузах*, **1**, 75 (2022). DOI: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48181737>
- [21] А.И. Мусиенко, Л.И. Маневич. *УФН*, **174**, 861 (2004). DOI: 10.3367/UFNr.0174.200408c.0861 [A.I. Musienko, L.I. Manevich. *Phys. Usp.*, **47** (8), 797 (2004).]