

О ФИЗИЧЕСКОМ МЕХАНИЗМЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ

Л. И. Филиппов¹

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

Приборный принцип (учет запаздывания сигнала), примененный к кулоновскому взаимодействию, позволяет объяснить физический механизм электромагнитной индукции во всех ее вариантах. Этот же подход в случае гравитационного взаимодействия приводит к формулам сил инерции как к следствию гравитационного взаимодействия ускоряющегося тела со всеми массами во Вселенной. Ранее из этих же посылок были получены все эффекты СТО, начиная с преобразований Лоренца. Вывод сил инерции из закона всемирного тяготения обосновывает принцип Маха – механизм эквивалентности инертной и гравитационной масс.

Ключевые слова: теория относительности, приборный принцип, преобразования Лоренца.

1. ВВЕДЕНИЕ

В разделе "Электродинамика" Фейнмановского курса физики сказано: "Для любой цепи, части которой движутся в постоянном магнитном поле, ЭДС равна производной потока по времени независимо от формы цепи... Фарадей открыл на опыте, что "правило потока" остается справедливым независимо от того, почему меняется поток. Сила, действующая на электрические заряды, в общем случае дается формулой $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$; новых особых "сил за счет изменения магнитного поля" не существует... Две возможности – "контур движется" или "поле меняется" – неразличимы в формулировке правила. Тем не менее для объяснения правила в этих двух случаях мы пользовались двумя совершенно разными законами, $\vec{v} \times \vec{B}$ для "движущегося контура" и $\vec{C} \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t$ для "меняющегося поля". Мы не знаем в физике ни одного другого примера, когда бы простой и точный общий закон требовал для своего понимания анализа в терминах двух разных явлений. Обычно столь красивое обобщение оказывается исходящим из единого глубокого принципа. Но в этом случае какого-либо особого глубокого принципа не видно."

В данной работе будет показано, что такой единый принцип есть – это приборный принцип. Он позволяет описать механизм электромагнитной индукции во всех случаях, вклю-

чая и те, которые считаются "исключениями" из правила потока. Механизм индукции и ее формулы будут строго выведены из кулоновского взаимодействия и запаздывания сигнала, приводящего к различному "сжатию" отрезков в неинерциальной системе отсчета. При этом исчезает необходимость в понятии "вихревого электрического поля" в пустом пространстве, принципиально иного, чем поле зарядов, и в понятии "тока смещения".

Аналогичный подход к гравитации показывает, что физический механизм реализации принципа Маха тот же, что и механизм электромагнитной индукции.

2. ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И МЕХАНИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИИ В УСКОРЯЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ ОТСЧЕТА

Описываемый ниже физический механизм отвечает и за возникновение силы инерции в ускоряющейся системе отсчета, и за возникновение ее аналога в электромагнетизме – индукции. Гравитационные силы на много порядков слабее электрических, поэтому чтобы гравитация могла стать источником инерции, необходимо участие всех масс Вселенной. Эффект "инерции" в электромагнетизме можно наблюдать уже как результат взаимодействия заряженной частицы и провода с током – ес-

ли ток изменяется во времени или вторичный контур приближается к проводу с постоянным током.

2.1. Длинный прямой провод, в котором растёт сила тока

Рассмотрим прямой провод и четыре системы отсчета (СО), движущиеся различным образом. В каждой из них наблюдатель получает "мгновенный снимок" участка этого провода (dl). Первая СО покоится, вторая СО движется равномерно параллельно проводу, третья и четвертая движутся с постоянным ускорением. Пусть точка провода (для простоты назовем ее "звезда") испускает сигналы, движущиеся относительно системы отсчета неподвижного провода с постоянной скоростью " c " (для простоты назовем эти сигналы "фотонами"). Иллюстрация показана на Рис. 1.

Фотон 1 прилетает к покоящемуся наблюдателю ($\vec{v} = 0$), фотон 2 – к движущемуся наблюдателю с $\vec{v}_1 = const$, фотоны 3 и 4 – к двум равномерно ускоряющимся наблюдателям. Каковы условные траектории этих фотонов, если каждый из четырех наблюдателей будет "рисовать" эти траектории в своей системе отсчета?

Траектории 1 и 2 – прямые линии, а 3 и 4 – искривлены, так как за время движения фотона от "звезды" до наблюдателя скорость наблюдателя возросла. На Рис. 1 эти траектории изображены с точки зрения СО провода и с точки зрения наблюдателей 1, 3 и 4. Углы наклона траекторий сильно преувеличены по сравнению с реальными – для наглядности. Так как $c \gg v$, где v – скорость СО, эти углы очень малы. В том числе мы считаем малым расстояние $at \ll c$, где t – время движения сигнала от "звезды" до наблюдателя.

Эта картина траекторий позволяет описать качественно, как будет выглядеть отрезок dl на "мгновенном снимке" в движущейся СО.

В покое и при равномерном движении отрезок провода dl , наблюдаемый из движущейся СО, испытывает "на снимке" сжатие (в зависимости от величины \vec{v}) по сравнению со своей длиной в покое. Однако при этом ситуация

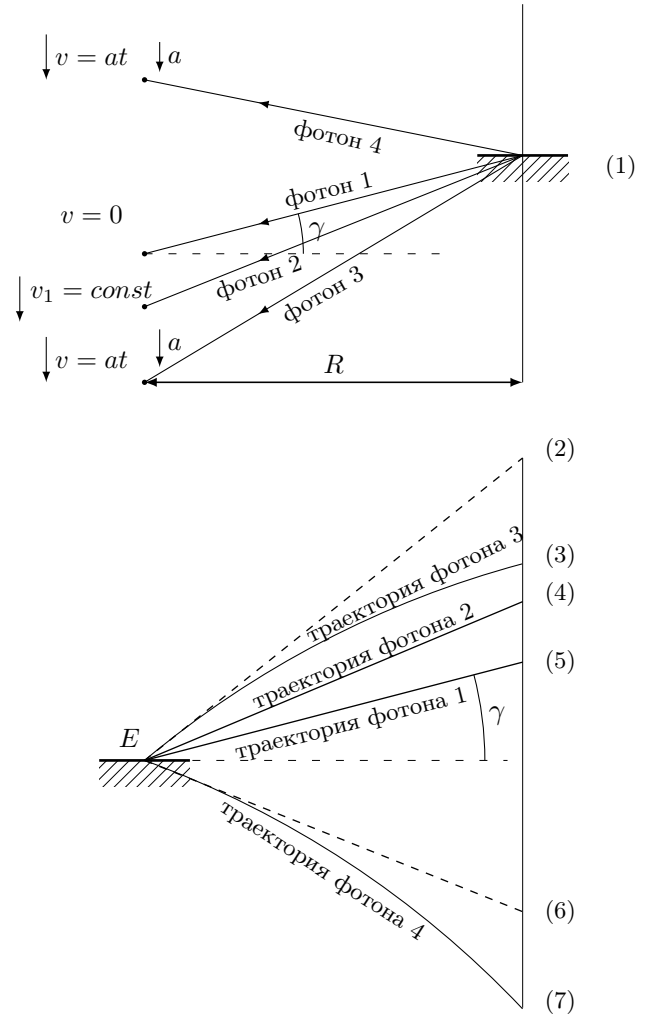


Рис. 1: Иллюстрация взаимодействия участка провода ("звезда") и зарядов в четырех различных системах отсчета. Верхняя панель показывает траектории сигналов ("фотонов") в системе отсчета провода. Заряд в первой СО покоится, во второй СО – движется равномерно вдоль провода со скоростью v_1 , в третьей и четвертой СО заряды движутся вдоль провода с постоянным ускорением a . На нижней панели показана та же ситуация с точки зрения СО 1-4.

(1) звезда; (2) звезда на снимке 3; (3) момент старта фотона 3; (4) звезда на снимке 2 и момент старта фотона 2; (5) звезда на снимке 1 и момент старта фотона 1; (6) звезда на снимке 4; (7) момент старта фотона 4

остается симметричной: сжатие отрезка, видимого под углом α вверх, и отрезка, видимого под углом α вниз, – одинаково. На "снимке" движущийся со скоростью v наблюдатель получает не сами отрезки, которые попали бы в

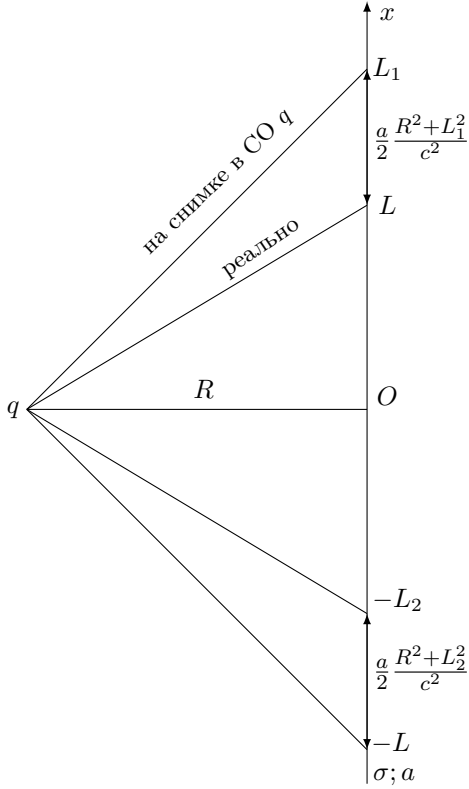


Рис. 2: Иллюстрация взаимодействия точечного (покоящегося) заряда q с участком прямого провода $[-L, L]$, движущегося с постоянным ускорением \vec{a} . Ситуация показана с точки зрения СО покоящегося заряда q .

диапазон $(\alpha, \alpha + d\alpha)$ в покое, но такие же по длине отрезки, какими они видны на "снимке". За время t , которое сигнал от "звезды" летел к наблюдателю, наблюдатель сместился на расстояние xt , поэтому участок dl , расположенный выше горизонтали в момент вылета сигнала, наблюдатель видит под углом большим, чем α , а нижний – под меньшим, чем α . Но скорость постоянна, поэтому симметрию это не нарушает: под прежним углом α наблюдатель видит то же самое, что и за время t до этого.

При $v \neq const$, как видно из нижней панели Рис. 1, искривление траекторий (то есть "геодезических") приводит к тому, что угол наблюдения выше горизонтали увеличивается по сравнению с углом вылета сигнала, а ниже горизонтали – уменьшается. За время t полета сигнала наблюдатель продвигается вниз на расстояние $v_0 t + at^2/2$ – и в новом положении

его скорость уже $\vec{v}_0 + \vec{a}t$, то есть участок вертикального провода \vec{dl} , который теперь получится у наблюдателя на "снимке", уже не тот же по длине: симметрия нарушена.

Рассчитаем, насколько возрастает сжатие отрезка выше горизонтали и уменьшается ниже горизонтали по сравнению с ситуацией, когда $\vec{v} = const$. Расчет будем вести из СО, в которой наблюдатель исходно неподвижен ($v_0 = 0$), инерциальной. В любой момент времени такая система отсчета существует. Расчет для случая $v_0 \neq 0$ также провести несложно, и он, как следовало ожидать, показывает, что начальная скорость на результат не влияет.

Рис. 2 показывает длинный прямой провод, в котором течет ток с плотностью заряда σ (Кл/м). Носители заряда движутся вверх с постоянным ускорением \vec{a} . В реальном проводе рост тока обусловлен включением в дрейф новых носителей, но это включение, как и тепловое движение, усредненно эквивалентно равноускоренному движению:

$$\frac{dI}{dt} = a\sigma. \quad (1)$$

Исходно симметричный отрезок $[-L, L]$, движущийся с ускорением a , получается в СО заряда q ("на снимке") в виде отрезка $[-L_2, L_1]$. Далее, полагаем в момент $t = 0$, $v_0 = 0$, и получаем уравнение на длины отрезков:

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

откуда находим:

$$L_1 = \frac{c^2}{a} - \sqrt{\frac{c^4}{a^2} - \frac{2c^2}{a} \left(L + \frac{aR^2}{2c^2} \right)} \quad (3)$$

и

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

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

$$L_{1,2} = L \pm \frac{a}{c^2} \left(L^2 + \frac{R^2}{2} \right). \quad (5)$$

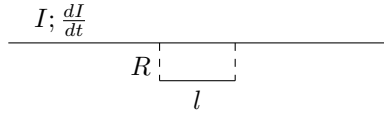


Рис. 3: Иллюстрация взаимодействия замкнутого прямоугольного контура $R \times l$ и длинного прямого провода с током I .

Действительно, отрезки выше и ниже СО испытывают различное растяжение.

Рассчитаем силу кулоновского взаимодействия заряда q с носителями заряда в проводе (в системе отсчета заряда). Эта сила, направленная вдоль провода и вызванная полученной асимметрией, равна:

$$F_x = \int_{-L_2}^{L_1} \frac{q\sigma x dx}{4\pi\epsilon_0 (R^2 + x^2)^{3/2}} = \frac{q\sigma a L(L^2 + R^2/2)}{2\pi\epsilon_0 c^2 (L^2 + R^2)^{3/2}}, \quad (6)$$

что при $L \gg R$ дает

$$F_x = \frac{1}{2\pi} \mu_0 \sigma q a, \quad (7)$$

так как $c^2 = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1}$.

2.1.1. Магнитная индукция длинного прямого провод

Рассмотрим замкнутый контур самого простого для анализа вида, который показан на Рис. ???. Это прямоугольник размерами $R \times l$, и найдем работу силы F_x (со стороны ускоряющихся зарядов в проводе) по перемещению единичного заряда q по всему этому контуру.

$$A_q = \frac{1}{q} \int_C \vec{F}_x \vec{dl}. \quad (8)$$

На отрезке контура, прилегающего к проводу, различного сжатия нет – и сила равна нулю, а на отрезках, перпендикулярных проводу, при обходе контура результат будет суммарно нулевой, Тогда получаем:

$$A_q = \frac{F_x l}{q} = \frac{1}{2\pi} \mu_0 \sigma a l = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{dI}{dt} l. \quad (9)$$

Это выражение совпадает с формулами классической электродинамики – законом Фарадея:

$$\epsilon_{\text{инд}} = \left| \frac{d(\Phi)}{dt} \right| = \frac{d(BRl)}{dt} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{dI}{dt} l, \quad (10)$$

где $B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{R}$ – магнитная индукция длинного прямого провода на расстоянии R от провода. Как видно, совпадение результата, полученного с использованием закона Кулона и приборного принципа, и результатов опыта Фарадея, обобщенных Максвеллом, полное.

2.2. Два концентрических кольцевых контура

Рассмотрим теперь более реальный случай, непосредственно совпадающий с опытами Фарадея. Сразу можно сказать, что точного совпадения результатов с классической формулой ожидать нельзя, так как магнитное поле кругового тока в классической электродинамике выражается неприводящимся интегралом, и результат будет заведомо приближенным. Аналогично, и логика приборного принципа, примененная к кольцевому току, приводит к подобном интегралу. Поэтому в обоих подходах мы будем иметь дело с приближениями.

Рассмотрим источник "переменного" поля, кольцо большого диаметра R , а ЭДС индукции вычислим в контуре меньшего радиуса r . Оба кольца находятся в одной плоскости. Ситуация изображена на Рис. 4.

Будем считать радиусы колец достаточно большими, а разницу между ними достаточно малой, $R - r \ll R$, чтобы в грубом приближении пользоваться выражением для силы в случае прямого провода (см, уравнение (7)).

Работа по переносу заряда по малому контуру равна:

$$A_q = \frac{F_x l}{q} = \mu_0 \frac{\mu_0 \sigma a}{2\pi} r \pi r \simeq \mu_0 R \frac{dI}{dt}, \quad (11)$$

где мы полагаем длину контура $l = 2\pi r \simeq 2\pi R$ и изменение силы тока $dI/dt = \sigma a$.

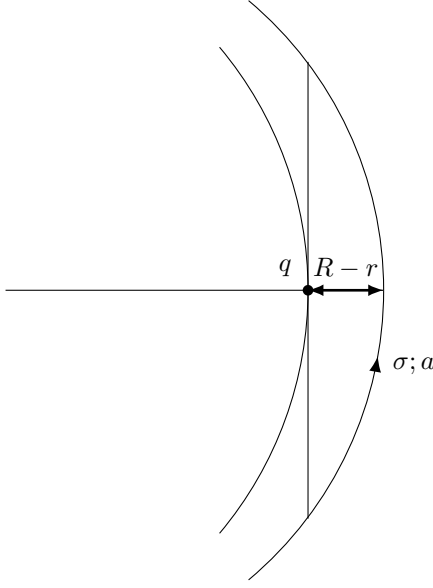


Рис. 4: Схема, описывающая взаимодействие двух концентрических кольцевых контуров радиусом $r < R$. В контуре меньшего радиуса показан пробный заряд q . В контуре большего радиуса идет ток $I = \sigma a$.

Согласно классической электродинамике индукция магнитного поля в центре кольцевого контура равна:

$$B(r = 0) = B_0 = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (12)$$

При увеличении радиальной координаты движения магнитная индукция $B(r)$ выражается в виде неприводящегося интеграла, однако при интегральном усреднении по площади кольца B оказывается меньше, чем B_0 в центре, примерно в $\sqrt{2}$ раза [Ссылка]. Тогда ЭДС индукции равно:

$$\varepsilon_{\text{инд}} = \left| \frac{d(\Phi)}{dt} \right| = \frac{d \int_{\pi R^2} \vec{B}(r) d\vec{S}}{dt} \simeq \mu_0 R \frac{dI}{dt} \frac{\pi}{2\sqrt{2}}, \quad (13)$$

О точном совпадении, как уже сказано выше, речь идти не может, т. к. оба результата заведомо приближенные.

Применение данной логики к кольцам одного диаметра, расположенным в параллельных плоскостях на малом расстоянии и имеющих общую ось, приводит к довольно громоздким математическим выкладкам и к точному совпадению результатов двух описанных подходов расчета $\varepsilon_{\text{инд}}$.

2.3. Сила инерции как следствие закона всемирного тяготения и запаздывания сигнала

Применим результат, полученный в разделе 2.1, к случаю гравитационного взаимодействия точечной массы "m" со всеми телами шара, окружающими точечную массу. Рассмотрим приближение однородного распределения массы гравитационных тел в шаре, описывая их плотностью " ρ ".

Для этого модель "прямой провод" заменим на цилиндрическую оболочку радиуса $(R; R + dR)$, а $[\sigma] = \text{Кл/м}$ на $[\rho] = \text{кг/м}^3$. Для области, ограниченной сферой радиуса R_0 , в центре которой расположено ускоренно движущееся вдоль оси цилиндра тело "m", логика совпадает со схемой на Рис. 1 и Рис. 2. Важное замечание: ситуация, в которой ускоренно движутся "заряды" в проводе, и ситуация, когда "заряды" в цилиндрической оболочке неподвижны, а тело "m" (заменившее здесь заряд "q") ускорено, полностью совпадают с точки зрения приборного принципа: запаздывание сигнала приводит в случае ускоряющейся точки "m" в точности к тем же формулам, что и в схеме Рис. 2; в системе отсчета пробного тела ("q" или "m") траектории "фотонов" будут те же, что и на нижней панели Рис. 1. Коротко говоря, в случае ускоренного движения мы имеем дело с чистым релятивистским эффектом: 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.

Итак, цилиндрическая оболочка длиной L – и заполнение такими телами шара радиуса R_0 . Объем отрезка цилиндрической оболочки $(R; R + dR)$, длиной dx ; $dV = 2\pi R dR dx$. Заполнение шара $(0; R_0)$:

В нашем случае R_0 – радиус Вселенной, ρ – средняя плотность вещества в ней. В пункте 2.1 сила мы получили выражение (7) для F_x . В данном случае, заменяя отрезок провода $(-L; L)$ на такую же цилиндрическую обо-

лочку, получаем:

$$F_x = \int_0^{R_0} \int_{-L_2}^{L_1} G \frac{m\rho dV}{R^2 + x^2} \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}}, \quad (14)$$

где $L_{1,2}$ определяются выражениями (3) и (4), где $L = \sqrt{R_0^2 - R^2}$. Интегрируя по dx , получаем:

$$F_x = \frac{m\rho G 2\pi a}{c^2} \int_0^{R_0} R dR \frac{L(L^2 + \frac{R^2}{2})}{(L^2 + R^2)^{3/2}}, \quad (15)$$

и затем:

$$F_x = \frac{4\pi\rho G}{c^2} ma \frac{4}{15} R_0^2 = \frac{16\pi}{15} \frac{GR_0^2\rho}{c^2} ma \quad (16)$$

Итак, мы показали, что со стороны Вселенной на тело массы m , которое движется прямолинейно с ускорением a , действует сила инерции: $F \simeq ma$. При современных оценках $\rho = 10^{-26}$ кг/м³; $R_0 = 3 \cdot 10^{26}$ м безразмерный комплекс $\frac{GR_0^2\rho}{c^2} \simeq 1$. Заметим, что оценки ρ и R_0 приближенные.

Важное замечание: в гравитации, в отличие от электростатики, есть только сила притяжения. Это приводит к тому, что во Вселенной сила инерции всегда выполняет роль отрицательной обратной связи: внешнее воздействие, стремящееся изменить скорость тела, приводит к росту силы инерции. Аналогично проявляет себя взаимодействие ускоряющегося заряда с носителями параллельного провода. Разница – в знаке: одноименные заряды отталкиваются. Поэтому в случае гравитации ситуация такова: Вселенная, ускоряясь, 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 ускоряется ток (электроны), в результате в другом проводе возникает ЭДС, разгоняющая легкие носители в нем в противоположную сторону (отсюда правило Ленца) – и в случае соленоида это срабатывает как инерция. Из этого можно сделать интересный вывод: если бы в нашей Вселенной появилось тело, обладающее антигравитацией, то для него взаимодействие с остальными

телами Вселенной имело бы характер положительной обратной связи: ускорение такого тела приводило бы к еще большему росту скорости – вплоть до превращения этого тела в свет. А равновесие его в состоянии покоя было бы неустойчивым. В случае кулоновского взаимодействия подобное не происходит, так как в реальной физике заряды взаимно уравновешены. Экспериментально подобную ситуацию создать, в принципе, можно, поместив одиночный заряд в сплошную среду с одноименным зарядом (например, в достаточно длинный и узкий промежуток между заряженными одноименно плоскостями) – и придав этому заряду исходное ускорение. В таком эксперименте ускорение заряженного тела будет больше, чем при прочих равных условиях в отсутствие заряда на плоскостях. Соответственно, если заряд на пластинах противоположен по знаку заряду частицы, инерция ее будет больше обычной.

Есть и совсем простой эксперимент, позволяющий проверить логику приборного принципа. Если сердечник обычного соленоида заменить на диэлектрический цилиндр, то придание такому сердечнику электрического заряда изменит индуктивность катушки: положительный заряд сердечника увеличит L катушки (аналог инерции при гравитационном взаимодействии), а отрицательный – уменьшит.

В работе Filippov (2022) было показано, что применение логики приборного принципа и закона всемирного тяготения к телу массы m , движущемуся с постоянной угловой скоростью по окружности радиуса r , вызывает центробежную силу

$$F_{ц/б} = m\omega^2 r,$$

Важным следствием полученных формул для сил инерции является вывод о том, что при $R_0 \rightarrow +\infty$ эти силы также стали бы бесконечными. То есть уже из оценки средней плотности и из соотношения инертной и гравитационной масс можно вычислить радиус Вселенной.

Приведенный в работе (Filippov 2022) вывод, основанный на сферических координа-

тах и на оценках углового сжатия отрезков "на снимке", потребовал нескольких упрощений в расчетах. Он может быть существенно упрощен: центростремительное ускорение при движении по окружности приводит к такому же искривлению "траекторий", как линейное ускорение – разница только в направлении изменения скорости. То есть приведенный здесь вывод можно применить к выводу центробежной силы – и тогда численный множитель при безразмерном комплексе оказывается таким же, как в формуле (16). Подход, основанный на оценке углового сжатия, отличается от логики, описываемой Рис. 2 этой статьи, но результаты их применения совпадают.

Здесь следует сделать важное замечание. Рассуждение о различном сжатии отрезков на "мгновенном снимке" в ускоряющейся СО остается корректным лишь в малых масштабах. Эти рассуждения описывают изменения именно угловых размеров – и только в этом смысле следует понимать термин "сжатие". Учитывая, что интегрирование проводится до больших радиусов, прямое применение схемы Рис. 2 привело бы к скорости, многократно превышающей скорость света. Однако для нашей логики достаточно получить величину сжатия для малых расстояний – и она будет верна для угловых преобразований независимо от расстояния. Роль играет только изменение угла из-за искривления воображаемых траекторий. А интегрирование в масштабах Вселенной уже не меняет полученного коэффициента сжатия. Тот факт, что информация доходит до тела за время порядка 10^{18} с, 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, приводя к их "сгущению" по одну сторону от тела – и к силе инерции, соответственно. Графически сказанное можно проиллюстрировать примерно так: см. Рис 5. (сила инерции – вверх).

Замечание о безразмерном комплексе в формуле (16). В работах Dicke (1957, 1959) и Sciama (1953) из анализа эйнштейновско-

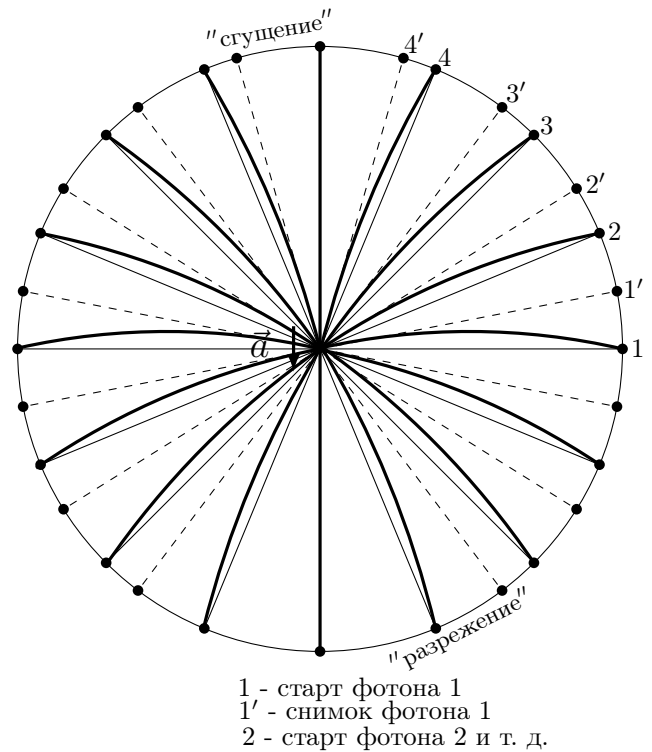


Рис. 5: Рисунок, иллюстрирующий картину искривленных траекторий для случая линейного ускорения. Аналогичен схеме, приведенной на нижней панели Рис.1. Все точки сферы смещены вверх от реального положения. Точки с номерами и соответствующие точки со штрихами обозначают точку старта фотонов и видимое положение 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.

го принципа эквивалентности для модели "тестового тела", свободно падающего на Солнце, и из соображения размерности получено следующее условие: безразмерный комплекс $\frac{GM}{R_0 c^2}$ должен быть порядка 1. Положив $M = \frac{4}{3}\pi R_0^3 \rho$, получаем совпадение данного комплекса с найденной нами константой.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ ПРИ ПОСТОЯННОМ ПОТОКЕ И ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ КОНТУРЕ

Вернемся к сказанному нами во введении к данной работе: докажем, что приборный принцип является тем единственным принципом, который объединяет два якобы различных явления: "контур движется" и "поле меняется".

Итак, пусть ток в длинном проводе будет постоянным, а форма контура на Рис. ?? изменяется: отрезок "l" движется к проводу. Рассмотрим ситуацию, в которой пробный заряд "q" движется перпендикулярно току $\vec{I} = const$ со скоростью $\vec{v}_1 = const$. 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 "звезды" к наблюдателю E (движущемуся с $v = const$ вниз, то есть в ситуации "фотон 2") наблюдатель успевает сдвинуться вправо на расстояние $v_1 t$, 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 "звезда" была неподвижна. Проще говоря, ускорение и сближение одинаково увеличивают угловую скорость носителей тока в проводе с точки зрения СО пробного заряда "q". Математически это описывается так:

1) Ситуация, когда симметрия и изотропия не нарушаются ("траектории" не искривлены) - равномерное движение, ($v_{др} = const; R = const$).

$$v_{др} = \frac{dx}{dt}; \tan d\alpha = \frac{dx}{R}, d\alpha/dt \approx \frac{v_{др}}{R}, \quad (17)$$

угол α мал.

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

$$\left(\frac{d^2\alpha}{dt^2}\right)_1 = \frac{(v_{др})'_t}{R} = \frac{a}{R}, \quad (18)$$

3) $I = const$; частица и провод сближают-

ся, $v_{др} = const; v_1 = -R'_t$:

$$\left(\frac{\partial^2\alpha}{\partial t^2}\right)_2 = -v_{др} \frac{R'_t}{R^2} = \frac{v_{др}v_1}{R^2} \quad (19)$$

Наша задача сделать ситуации (2) и (3) идентичными для СО заряда "q", т. е. $\left(\alpha''_t\right)_1 = \left(\alpha''_t\right)_2$. Значит,

$$v_1 = \frac{aR}{v_{др}}, \quad (20)$$

Итак, приближение пробного заряда к проводу с постоянным током $I = v_{др}\sigma$ 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 (20). Убедимся в этом.

На носители заряда в плече рамки l действует сила Лоренца $\vec{F}_Л = q\vec{v}_1 \times \vec{B}$. При этом $B = \mu_0 I / 2\pi R = \mu_0 \sigma v_{др} / 2\pi R$, т. е.

$$F_Л = \frac{\mu_0 \sigma v_{др}}{2\pi R} q v_1$$

Учитывая (20), получаем выражение для работы силы Лоренца на единицу заряда по всему контуру:

$$A_q = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{dI}{dt} l,$$

то есть ЭДС та же, что в случае, описываемом формулой (9).

Этот результат ожидаем, поскольку природа силы Лоренца и природа ЭДС индукции при ускорении тока – одна и та же (см. Filippov 2020c) – кулоновское взаимодействие плюс запаздывание сигналов. То есть такие понятия, как поток вектора магнитной индукции являются, несомненно, необходимыми мнемоническими и математическими моделями, но суть физических явлений заключена в реально существующих взаимодействиях. А таких взаимодействий (если не затрагивать внутриядерные процессы и спин) всего два: кулоновское и гравитационное. И, если бы скорость распространения информации о гравитационном и электрическом взаимодействии была бесконечной, то явлений магнетизма, электромагнитной индукции и механической инерции не было бы.

4. ИСКЛЮЧЕНИЯ ИЗ "ПРАВИЛА ПОТОКА"

Формула $\epsilon_{\text{инд}} = -d\Phi/dt$ является математическим обобщением опытных данных, и она не обязательно должна описывать все возможные случаи возникновения (или отсутствия) ЭДС индукции. Практика показывает, что исключения действительно существуют. Однако закон Кулона и запаздывание световых сигналов претендуют на объяснение самой сути явления – его физического механизма – и потому никаких исключений, которые эта логика не может описать, быть не должно. Покажем это.

4.1. Вращающийся медный диск

Этот опыт описан, в частности, в курсе "Фейнмановские лекции по физике" (том 6, глава 17, пункт 2). В этом опыте изменение магнитного потока через контур равно нулю, а ЭДС ненулевая.

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. Причина – кулоновское взаимодействие и приборный принцип; следствие – ЭДС в контуре "ось диска – его обод". При этом $d\Phi/dt$ через этот контур равно нулю. То есть правило $\epsilon_{\text{инд}} = -d\Phi/dt$ описывает не все возможные опытные ситуации.

4.2. "Парадокс" и импульс поля

В "Фейнмановских лекциях" (том 6, глава 17, пункт 4) описан еще один опыт, который, если строго следовать 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 это, в свою очередь, привело к рождению теории относительности. Но эти дополнения физической реальности сыграли и иную роль. Если считать вихревое электрическое поле настолько реальным, что оно во всех случаях, где присутствует переменное магнитное поле, обладает реальным импульсом, это необходимо приведет к парадоксам. В частности, в опыте, описанном Фейнманом.

На легком горизонтальном диске, свободно вращающемся вокруг вертикальной оси, имеется катушка – короткий соленоид, концентрический по отношению к оси вращения с собственным источником тока. В момент включения тока возникает быстро растущее магнитное поле, а значит, и вихревое электрическое. По окружности на краю диска на равном расстоянии размещены металлические шарики, изолированные друг от друга диэлектриком, из которого изготовлен диск. В момент включения тока (как и в момент выключения) вихревое электрическое поле, если оно действительно существует, должно оказывать на каждый шарик силовое воздействие, касательное к окружности диска, то есть диск начнет 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, скажем, конькобежцы, обладающие реальной 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 "конькобежцев" остается все время нулевым. Чтобы закон сохранения выполнялся, придется приписать магнитному полю реаль-

ный 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.

В то же время реальное объяснение любого электромагнитного взаимодействия кулоновскими силами и запаздыванием сигналов никаких парадоксов не вызывает (разумеется, включение тока приводит к круговому движению носителей заряда в проводах соленоида, но их масса и скорость дрейфа вызывает момент импульса, намного 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. Да, 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 – закон Ньютона, в отличие от действия "вихревого поля", где противодействия нет из-за отсутствия материального тела – источника этого "поля".

Разумеется, никакое взаимодействие внутри замкнутой системы, не может привести к изменению ее суммарного момента импульса. В противном случае можно было бы, например, раскрутить космический корабль вокруг его оси, используя включение тока в соленоиде и заряды по ободу диска, подобно описанному, – без всякого реактивного или гироскопического эффекта, но это, конечно, не так.

Введение в физическую картину мира "нового" электрического поля без зарядов, а также присывание магнитному полю момента импульса, зависящего от наличия в системе заряженных тел, приводит к неоднократному нарушению принципа Оккама, множа число физических сущностей без необходимости. Ре-

зультат – возникновение парадоксов, нарушающих базовые законы сохранения.

5. ОБ ЭНЕРГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

В отличие от импульса, приписывая который магнитному полю, мы вынуждены согласиться с представлением, в рамках которого импульс "бежит по кругу" вокруг постоянного магнита, энергия магнитного поля – вполне естественная величина. В случае, например, плоского конденсатора, его энергия ($CU^2/2$) равна работе по его зарядке – и работе по переносу его пластин на расстояние, где сила их взаимодействия нулевая. Отличие "энергии магнитного поля" от потенциальной энергии электростатического взаимодействия качественное: магнитное поле требует динамики (тока) и не может существовать в статической системе. Тем не менее, энергия соленоида с током ($LI^2/2$) имеет вполне наглядную интерпретацию, которая, в отличие от момента импульса "вихревого поля", не приводит ни к каким парадоксам и описывается – как и любая реальная величина в электродинамике – кулоновским взаимодействием, без привлечения новых сущностей для спасения законов сохранения. Именно, кольцевые токи в витках соленоида притягиваются из-за силы Лоренца (для объяснения которой, как было показано, достаточно закона Кулона и приборного принципа). Несложный расчет показывает, что работа, совершаемая силами притяжения витков соленоида при полном их распрямлении (до превращения катушки в прямой провод с нулевой индуктивностью – то есть и с нулевой энергией поля), равна работе источника напряжения по преодолению "электромагнитной инерции" (индуктивности) при нарастании тока от нуля до значения $I = const$. Покажем это. Закон Био-Савара:

$$B = \frac{\mu_0 I \Delta l_1}{4\pi x^2}; \Delta F = BI \Delta l_2, \quad (21)$$

x и $\Delta l_{1,2}$ - это ... Два кольца в соленоиде:

$$\Delta l_1, \Delta l_2 \leq 2\pi R$$

Работа

$$A = N \frac{1}{2} \frac{\mu_0 I^2 (2\pi R)^2}{4\pi} \int_0^{+\infty} \frac{dx}{x^2} = \frac{\mu_0 \pi R^2 l I^2 n^2}{2},$$

где l - длина катушки; R - радиус; N - число витков; $n = \frac{N}{l}$

Классические формулы:

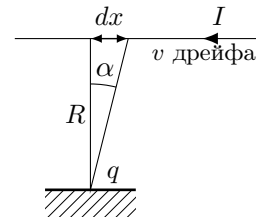
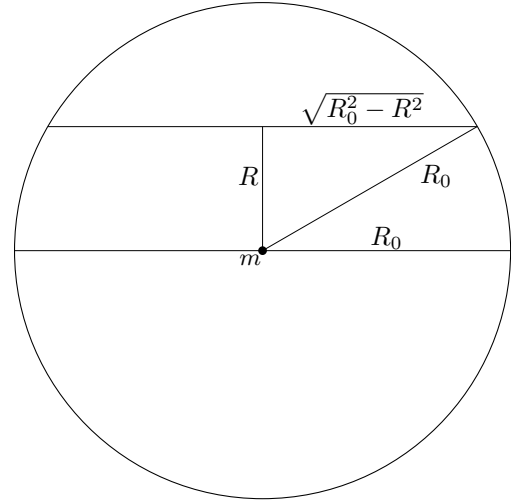
$$E_{\text{магн}} = \frac{LI^2}{2}; L = \frac{\pi R^2 n^2 l}{\varepsilon_0 c^2},$$

$$E = \frac{\mu_0 \pi R^2 l I^2 n^2}{2}, \quad (22)$$

Иначе говоря, для физической интерпретации понятия "энергия магнитного поля соленоида" не требуется новых сущностей: это потенциальная энергия взаимодействия всех витков соленоида (вполне аналогично потенциальной энергии взаимодействия обкладок конденсатора). Считая индуктивность аналогом инертной массы, ток – аналогом скорости, а напряжение – силы (или, в качестве варианта, аналогом давления), мы получаем адекватные формулы для энергии и для законов Ньютона, но – не формулу импульса, ибо произведение LI ни по размерности, ни по физическому смыслу импульс не отражает.

Как известно, настоящие трудности встают перед классической электродинамикой при попытке описать излучение электромагнитных волн. Да, уже сам факт конечности скорости распространения информации о кулоновском взаимодействии эквивалентен утверждению о существовании переносящего энергию излучения, и для описания простейшего случая излучения гармоническим осциллятором достаточно знания закона Кулона и скорости сигнала (см. Рис. 8):

Разумеется, для описания всех видов электромагнитного излучения, этого недостаточно. Тем не менее, само понятие "поле" основывается именно на запаздывании сигнала – на "теории близкодействия". Важно не забывать, что речь идет о кулоновском взаимодействии. Созданные гением Максвелла "взаимоподдерживающие" вихревые поля – электрическое и магнитное, – составляющие электромагнитную волну, движущуюся со скоростью



$\frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ в вакууме – грандиозный этап в истории науки. И все же нужно 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".

6. ПРИБОРНЫЙ ПРИНЦИП И МОДЕЛЬ АТОМА РЕЗЕРФОРДА-БОРА

В 1905 году в ведущем физическом журнале "Annalen der Physik" появились три гениальные статьи Альберта Эйнштейна, ознаменовавшие сразу две революции в физике. Кроме основ СТО, сформулированных в первой из них ("К электродинамике движущихся тел", Annalen der Physik 322(10) 891-921 (1905)), во второй ("Зависит ли инерция тела от содержащейся в нем энергии", Annalen der Physik 323(13) 639-641 (1905)) был сформулирован принцип соотношения инертной массы и излученной энергии: формула Эйнштейна $E_{\text{излучения}} = \Delta mc^2$, а в третьей была решена проблема дискретности электромагнитного излучения: еще одна формула Эйнштейна

на $E = h\nu$ (ссылка).

Это позволило разрешить целый ряд ключевых проблем физики, в частности была снята "проблема красной границы фотоэффекта" и появились предпосылки для разрешения Нильсом Бором задачи планетарной модели атома Резерфорда. Граница между классической и квантовой электродинамикой прошла, образно говоря, по модели атома – между атомом Резерфорда и атомом Бора. Что может дать применение приборного принципа к анализу планетарной модели атома? Рассмотрим это.

Нильс Бор, описывая взаимодействие электрона на круговой орбите и протона (ядра) в модели атома водорода, приравнивал кулоновскую силу – с учетом релятивистской поправки – центробежной силе:

$$\frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 R^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_e v^2}{R} \quad (23)$$

В данном случае модель кулоновского взаимодействия, диктуемая приборным принципом, приводит к иной формуле. Именно, принимая ядро атома за основу инерциальной СО и рассматривая кулоновское взаимодействие через "сжатие на мгновенном снимке" отрезков, наблюдаемых из движущейся системы, а также используя модель силовых линий (Filiprov 2020c), получаем:

$$\frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 R^2 (1 - \frac{v^2}{c^2})} = \frac{m_e v^2}{R} \quad (24)$$

Это равенство приводит к квадрату уравнению относительно скорости. Решений у этого уравнения два, и оба они несут реальный физический смысл:

$$\begin{aligned} v_1^2 &= \frac{c^2}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{q_e^2}{\pi\epsilon_0 R m_e c^2}} \right) \\ v_2^2 &= \frac{c^2}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{q_e^2}{\pi\epsilon_0 R m_e c^2}} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

То есть для каждого радиуса орбиты (R) есть два значения скорости, при которых

электрон на этой орбите будет в равновесии, при условии:

$$R \gg r_0 = \frac{q_e^2}{\pi\epsilon_0 m_e c^2} \quad (26)$$

Неравенство (26) устанавливает границу взаимодействия; ниже этой границы классическая электродинамика становится неприменимой (величину $\frac{r_0}{4} = \frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} = \frac{e^2}{m_e c^2}$ принято называть "классическим радиусом электрона").

Большее из двух возможных значений орбитальной скорости v_1 обеспечивает равновесие за счет большего сжатия, компенсируемого большей центробежной силой (как будет показано ниже, на реальных орбитах это ультрарелятивистская скорость, а v_2 – "классическая").

Для дальнейших рассуждений классической электродинамики и логики приборного принципа нам будет недостаточно, ибо в рамках этой логики электрон на любой орбите должен излучать энергию: на круговой орбите заряд, равномерно движущийся вокруг равно ему по модулю заряда, при рассмотрении в плоскости орбиты фактически совпадает с диполем на Рис. 8, а значит, должен излучать на частоте $\nu = v/(2\pi R)$ и всех ее гармониках (максимально – в плоскости орбиты).

Используем две формулы Эйнштейна ($E_\gamma = \Delta m c^2$) и ($E_\gamma = h\nu$), чтобы найти длину волны кванта, в который "превращается" электрон, если он движется со скоростью света ("комптоновская длина волны электрона"): $m_e c^2 = h\nu$, откуда

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e c} \quad (27)$$

И рассмотрим такую "дуальную" модель, диктуемую "двойным" решением для скорости: радиус орбиты должен быть таким, чтобы выполнялось условие – быстрая "версия" электрона пролетает расстояние $2\pi R + \lambda$ за то же время, за которое классическая пролетает расстояние λ :

$$\frac{2\pi R + \lambda}{v_1} = \frac{\lambda}{v_2}. \quad (28)$$

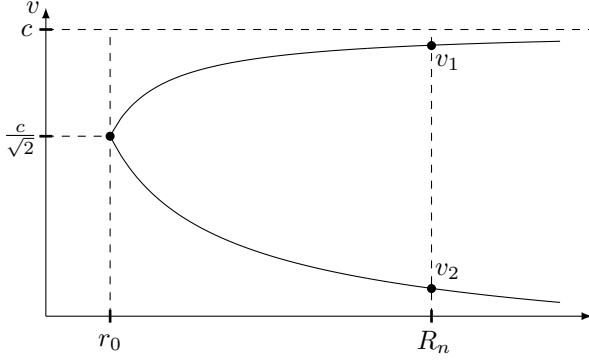


Рис. 6: Иллюстрация решения уравнения (28). Зависимость быстрой и медленной "версий" электрона от радиуса орбиты.

На Рис. 6 показана зависимость $v(R)$, складующая из уравнения (28).

Полагая r_0/R мывлм параметром, выражение (25) приводится к виду:

$$v_{1,2}^2 \approx \frac{c^2}{2} \left(1 \pm \left(1 - \frac{q_e^2}{2\pi\epsilon_0 R m_e c^2} \right) \right) \quad (29)$$

Тогда, учитывая (27) и (28), получаем следующее решение:

$$R = \frac{\hbar^2 \epsilon_0}{\pi m_e q_e^2}, \quad (30)$$

При этом совпадение двух "версий" электрона – условие (28), – с учетом выкладок выше, означает следующее:

$$R_n = n^2 R, n = 1, 2, 3, \dots, \quad (31)$$

Например, для $n = 2$ расхождение двух "версий" будет равно 2λ , и т. д.. Таким образом, выражения (30) и (31) дают значения радиусов боровских орбит для атома водорода. Для полученных значений R_n выполняется соотношение скоростей "быстрой" и "медленной" версий электрона:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{q_e^2}{2\epsilon_0 \hbar c} \approx \alpha \quad (32)$$

Скорость v_2 очень близка к скорости света, то есть "быстрая" версия электрона на орбите R_1 и выше практически является электромагнитной волной с длиной волны λ .

$$\begin{aligned} v_1 &\approx \sqrt{1 - \alpha^2} c \\ v_2 &\approx \alpha c \\ R_n &= \left(\frac{n}{\alpha}\right)^2 r_0 \quad \left(R_1 = \frac{r_0}{\alpha^2}\right) \\ \left(\alpha \approx \frac{1}{137}, r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2}\right) \end{aligned} \quad (33)$$

И_R чтобы повторить всю логику Бора,

$$\begin{aligned} \Delta E_{(n+1)-n} &= \Delta E_{\text{кин}} + \Delta E_{\text{пот}} = \\ &= \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right] m_e c^2 \frac{\alpha^2}{2} = \\ &= \left[\frac{1}{n^2} - \frac{1}{(n+1)^2} \right] R_E \end{aligned} \quad (34)$$

(R_E - энергия Ридберга)

Современное понимание логики модели атома Бора иное: стабильность на орбите R_1 диктуется условием существования стоячей волны, для чего размер потенциальной ямы должен быть больше $\frac{\lambda}{2}$ частицы – и частица при этом ведет себя как фотон с длиной волны λ .

По сути, выше сказано то же самое. С той разницей, что "дуализм" поведения электрона на орбите априори диктуется двойным решением уравнения для скорости. Физический смысл дискретности орбит в модели атома Бора – квантование момента импульса: $m_e v R = \hbar n$; это условие приводит к тем же результатам, что описаны выше. Как же физический смысл заключается в целнопериодическом совпадении полных "длин волн" быстрого (практически светового) электрона – и медленного (частицы) – чтобы это позволяло такой "дуальной паре" не излучать на орбите R_n ?

Так как $\lambda \ll R_n$, это условие означает постоянное (каждый период $\frac{2\pi R}{v_1}$) совпадение по фазе двух "волн". Разумеется, чисто физически разделение одного и того же электрона на одной орбите на две "ипостаси" лишено смысла – во всяком случае, с классической точки зрения. Однако это трудно осмыслить не в большей степени, чем такие понятия, как дуализм фотона, волну де Бройля или принцип запрета Паули. А синфазность этих двух

"волн" подобна условию минимума в интерференционной картине – и в этом не меньше физического смысла, чем в стоячей волне. Пока теория не ушла от "полуклассической" и не стала чисто квантовой – в смысле вероятностной трактовки Шредингера – любое "приговаривание" к формулам Бора физического смысла было более или менее натянутым.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учет конечной скорости распространения информации о взаимодействиях – приборный принцип, – будучи примененным к кулоновскому и гравитационному взаимодействиям, позволяет получить верные формулы для центробежной силы и линейной силы инерции, которые являются следствием гравитационного взаимодействия ускоряющегося тела со всеми массами Вселенной, то есть обосновать механизм принципа Маха, а также получить формулы для силы Лоренца и для закона электромагнитной индукции во всех вариантах. Все это позволяет объединить единым физическим принципом физические явления, которые рассматривались как независимые сущности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен Е. Михайлову и В. Клименко за помощь в подготовке публикации и обсуждении результатов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

M. Consoli and A. Pluchino, *Universe* **7** (8), 311 (2021).

P. Delva, J. Lodewyck, S. Bilicki, et al., *Phys. Rev. Lett.* **118** (22), 221102 (2017).

R. H. Dicke, *Reviews of Modern Physics* **29** (3), 363 (1957).

R. H. Dicke, *Science* **129** (3349), 621 (1959).

A. Einstein, *Annalen der Physik* **322** (10), 891 (1905).

L. I. Filippov, V. V. Klimenko, *Fizicheskoe obrazovanie v vyzah* **1** (10), 75 (2022) [in Russian].

L. I. Filippov, *World journal of mechanics* **6** (1), 305 (2016).

L. I. Filippov, *Fizicheskoe obrazovanie v vyzah* **3** (10), 84 (2020a) [in Russian].

L. I. Filippov, *Fizicheskoe obrazovanie v vyzah* **1** (1), 16 (2020b) [in Russian].

L. I. Filippov, *Fizicheskoe obrazovanie v vyzah* **4** (1), 21 (2020c) [in Russian].

D. Mattingly, *Living Reviews in Relativity* **8** (1), 5 (2005).

A. I. Musienko and L. I. Manevich, *Physics Uspekhi* **47** (8), 797 (2004).

D. W. Sciama, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **113**, 34 (1953).

P. Wolf and G. Petit, *Phys. Rev. A* **56** (6), 4405 (1997).