

# Показатель преломления света и относительные проницаемости вакуума в гравитационном поле

И. Мисюченко

СПб, 16.07.2018 г.

Попытаемся разобраться в том, как в парадигме электромагнитного подхода ведёт себя вакуум вблизи гравитирующих тел. В рамках ОТО (для слабой гравитации) [7] вводится показатель преломления вакуума  $n$ , зависящий от гравитационного потенциала  $U = -\frac{GM}{R}$ :

$$(1) n = 1 - 2\frac{U}{c^2} = 1 - 2\Phi$$

Где  $G$  – гравитационная постоянная,  $M$  – масса гравитирующего тела,  $R$  – расстояние от центра тела. Здесь ведён нормированный на квадрат скорости света потенциал  $\Phi = \frac{U}{c^2}$ . Следовательно, идея изменяющихся под действием тяготения электромагнитных параметров вакуума – не нова. Гравитационный потенциал всегда отрицателен, соответственно, показатель преломления в гравитационном поле превышает 1-цу и растёт с ростом абсолютной величины потенциала, т.е. в направлении источника тяготения. Однако, как именно появился этот показатель преломления? Он появился из расчётов и экспериментов по отклонению луча света, касательного к поверхности гравитирующего тела. По теории Ньютона, фотон должен был отклониться на некий градус, летя по касательной к телу из бесконечности в бесконечность. Но этот градус оказывался вдвое меньше, чем было установлено на опыте [6]. То есть *вещественная* частица, отклонилась бы именно так, как предсказывает теория тяготения Ньютона, а вот свет на поверку – вдвое сильнее. Почему? Потому, что свет движется с предельной скоростью в местном вакууме и не может, подобно досветовой частице, реагировать на гравитацию *и* изменением траектории *и* меняя модуль скорости. *Свет не может изменить модуль скорости*, только направление. Отсюда и более сильное отклонение, так как он не может ускоряться вдоль траектории, а может только сильнее искривить свою траекторию, реагируя на тяготение. И вот это-то *добавочное* к «ньютоновскому» отклонение, равное по величине ещё одному «ньютоновскому», и следует связать с *оптическим* показателем преломления вакуума [1]. Не всё отклонение (ибо свет – такой же материальный объект, как электрон или метеорит и точно также притягивается источником тяготения), а только специфическую *добавку*, возникающую именно для света и радиоволн. И правда, метеорит вряд ли отреагирует на чисто *оптический* показатель преломления вблизи гравитирующего тела, а вот свет – просто обязан, даже если бы никакого тяготения здесь вовсе не было. Мы не первыми обратили внимание на эти аспекты движения света в поле тяготения. Л. Б. Окунь в [3] на с. 12 отмечает: «...сила, действующая на горизонтально летящий фотон, в 2 раза больше, чем на летящий вертикально». Это прямо и указывает на то, что кроме тяготения, как такового, вблизи гравитирующих тел существует и ещё какая-то причина, действующая на свет, очень похожая на оптический показатель преломления. Так, например, в сферической градиентной линзе с радиальным градиентом показателя преломления, свет, радиально испущенный из центра, никуда не отклонится. В то же время движущийся под углом к радиусу – отклонится. А вот на обычный камень сила тяготения действует одинаково, что вертикально он движется, что горизонтально. То есть на свет действует не только сила тяжести, но и *что-то ещё*, вот это «что-то» и можно связать с «показателем преломления». Но в ОТО *всё* отклонение света, *весь* компонент метрического тензора  $g_{00} = 1 - 2\Phi$  связывают с показателем преломления  $n$ , откуда и появляется двойка в (1). А тогда, получается, что реальный прирост показателя преломления вдвое меньше и, соответственно, зависящую от гравитационного потенциала часть в (1) надо уполовинить:

$$(2) \quad n = 1 - \frac{U}{c^2} = 1 - \Phi$$

Возьмём теперь градиент от обеих частей (2):

$$(3) \quad \vec{\nabla} n = \vec{\nabla}(1 - \Phi) = -\vec{\nabla}\Phi$$

Теперь вспомним выражение, связывающее гравитационный потенциал и ускорение свободного падения (оно же - напряженность гравитационного поля)  $\vec{g}$

$$(4) \quad \vec{g} = -\vec{\nabla}U = -c^2\vec{\nabla}\Phi$$

Соответственно, (3) с учётом (4) можно записать как:

$$(5) \quad \nabla n = \frac{\vec{g}}{c^2} \Rightarrow \vec{g} = c^2 \nabla n$$

Это означает, что градиент показателя преломления направлен в ту же сторону, что и ускорение свободного падения. Теперь вспоминаем, как показатель преломления  $n$  зависит от *относительной* диэлектрической проницаемости  $\varepsilon$  среды и её магнитной проницаемости  $\mu$ :

$$(6) \quad n = \sqrt{\mu\varepsilon}$$

Магнитные явления в вакууме имеют только один источник – движение *электрического* поля, так как, в отличие от вещества, никаких собственных магнитных свойств у вакуума нет. Потому что в нём нет ни атомов, ни молекул, имеющих собственные «встроенные» магнитные моменты. К чему это приводит? Например, для медленно движущегося электрона магнитный векторный потенциал  $\vec{A} = \frac{\vec{v}\varphi}{c^2} = \frac{\vec{v}q}{4\pi\varepsilon_0 c^2 r} = \frac{\mu\mu_0 \vec{v}q}{4\pi\varepsilon r}$ . Пусть  $\varepsilon$  отличается от 1-цы. В формуле для векторного потенциала под скоростью света  $c$  подразумевается не реальный физический параметр местной мировой среды, а всего лишь размерный коэффициент  $c_0^2 = \frac{1}{\varepsilon_0\mu_0}$ , являющийся «мировой константой». А магнитную проницаемость мы сознательно записали как  $\mu\mu_0$ , поскольку как раз и хотим выяснить, отличается ли от 1-цы этот  $\mu$ . Импульс электрона  $\vec{P} \sim q\vec{A}$ . Закон сохранения импульса требует, чтобы импульс в консервативной системе сохранялся. Заряд – инвариант, в силу медленности движения размеры тоже считаем инвариантами. Соответственно, если мы увеличим  $\varepsilon$  среды, то чтобы закон сохранения импульса продолжал работать необходимо, чтобы во столько же раз увеличилась и  $\mu$  среды, т.е. чтобы  $\frac{\mu}{\varepsilon} \equiv 1$ . А это, кстати, означает, что волновое сопротивление вакуума  $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu\mu_0}{\varepsilon\varepsilon_0}} = const$ , т.е. является инвариантом в большей степени, чем даже скорость света. И этот вывод подтверждается отсутствием отражения света от окрестностей сильно гравитирующих тел. Если бы тяготение приводило к изменениям волнового сопротивления вакуума, то электромагнитные волны/свет частично отражались бы от неоднородностей  $Z_0$ , и тогда вокруг «чёрных дыр» существовал бы некий светящийся ореол. То есть в вакууме нельзя *отдельно* изменить диэлектрическую проницаемость, а отдельно – магнитную. Нет способа. Только совместно и коррелировано [2]. И, тогда, соответственно, во столько же раз изменится и показатель преломления (6). Получаем связь между малыми изменениями показателя преломления и относительными проницаемостями вакуума в поле тяготения:

$$(7) \quad \Delta n = \Delta\varepsilon = \Delta\mu$$

Соответственно, (5) можно переписать с учётом (7) в виде:

$$(8) \quad \vec{\nabla}\varepsilon = \vec{\nabla}\mu = \vec{\nabla}n = \frac{\vec{g}}{c^2} \Rightarrow \vec{g} = c^2 \vec{\nabla}\varepsilon$$

Таким образом, используя (8) в (2) получим:

$$(9) \quad \varepsilon = 1 - \Phi$$

То есть диэлектрическая проницаемость вакуума убывает обратно пропорционально расстоянию от центра гравитирующего сферического тела, и наоборот, возрастает с приближением к нему. Точно также, как истинный показатель преломления. При этом градиент диэлектрической проницаемости прямо пропорционален градиенту гравитационного потенциала, взятому с обратным знаком, т.е. ускорению свободного падения  $c^2 \text{grad}(\varepsilon) = g = -\text{grad}(U) = -\text{grad}(c^2 \Phi)$ .

Заодно мы внесли ясность в вопрос: почему, коль скоро причиной тяготения можно считать градиент диэлектрической проницаемости вакуума, свет отклоняется вдвое сильнее, чем частица? Ведь причина тяготения – градиент, а не сама величина проницаемости. Так почему свет отклоняется в том же градиенте вдвое сильнее? А вот почему! На частицу действует градиент *диэлектрической* проницаемости вакуума, и этот, по сути *электростатический* механизм прост и понятен и сводится к действию *электрических* пондеромоторных сил. На свет он *тоже* действует, как и на любое электрическое поле вообще. Но на свет действует *ещё* и градиент *магнитной* проницаемости (поскольку «магнитная» энергия света равна его электрической энергии)! Который в относительных величинах точно таков же (7), как и у диэлектрической проницаемости. Можно предположить, что по мере того как доля кинетической (т.е. «магнитной») энергии в полной энергии частицы растёт, она начинает вести себя подобно свету в гравитационном поле, т.е. отклоняться сильнее и в конце концов при околосветовых скоростях уподобится «фотону». Здесь даже можно, вероятно, выполнить экспериментальные проверки, например, по отклонению ультрарелятивистских протонов в поле тяготения Солнца. Пока что о таких экспериментах нам ничего не известно.

Полноты ради рассмотрим вопрос ещё и с кинематической точки зрения, т.е. попытаемся сопоставить результат (9) с «кинематической» теорией тяготения. Согласно кинематическому подходу, окружающий гравитирующее тело вакуум (мировая среда, эфир) просто *падает* на тело, приобретая вблизи поверхности ускорение  $g$  и вторую космическую скорость  $v_2$ , по законам тяготения Ньютона. Согласно этим законам *любое* тело, *любой* массы (даже исчезающе малой массы!) будет падать совершенно одинаково. Тогда что мешает также *падать самому вакууму*? В отличие от вещественных тел он не остановится на поверхности гравитирующего тела (ибо что может остановить физический вакуум?), а пролетит дальше, вглубь. Достигнет центра и продолжит двигаться дальше, но уже не с ускорением, а с замедлением. И вновь достигнет второй космической скорости, вылетев из-под поверхности в противоположной точке. Соответственно, *весь* окружающий гравитирующее тело вакуум находится в ускоренном падении (или замедленном взлёте) с ускорением  $g$  и скоростью  $v_2$ . Таким образом, согласно кинематической теории тяготения вакуум просто падает с ускорением, и тем самым заставляет падать с тем же ускорением все другие тела (иначе они будут иметь ускорение *относительно вакуума*, а это немедленно вызовет появление ньютоновской силы инерции, которую мы и принимаем за силу тяготения). Раз вакуум находится в движении с некоторой скоростью, то это всё равно что неподвижные (относительно поверхности гравитирующего тела) объекты двигались бы в вакууме с противоположной по направлению и такой же по величине скоростью  $v_2$ . А тогда мы должны наблюдать (глядя из дальнего космоса) *релятивистские эффекты* такого движения: замедление времени, сокращение длин, рост массы, *преобразование электрического и магнитного поля* и т.п. Причём эти эффекты описываются релятивистским множителем [5]:

$$(10) \quad \gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v_2^2}{c^2}} = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$$

Вспомним, чему равна *вторая космическая* скорость [4] по Ньютону (во введенных нами обозначениях):

$$(11) \quad v_2^2 = \frac{2GM}{R} = -2\Phi c^2$$

Теперь используем для (10) известное разложение  $\sqrt{1-x} \approx 1 - \frac{x}{2}$ :

$$(12) \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v_2^2}{c^2}}} \approx \frac{1}{\sqrt{1+2\Phi}} \approx 1 - \Phi$$

Сравните (12) с (2) и (9). Поскольку скорость входит в выражения (10-12) в квадрате, то не имеет никакого значения «падает» вакуум или «взлетает». Или половина его падает, а половина взлетает. Или он весь одновременно, каким-то чудом, и падает, и взлетает. Квадрат скорости будет одним и тем же. Тогда релятивистское преобразование электрического поля в направлении движения вакуума, связанное со второй космической скоростью в данной точке, можно описать как изменение диэлектрической проницаемости вакуума в этой точке. То есть можно сказать что поле исказилось в результате движения относительно вакуума, а можно сказать что сам вакуум изменил проницаемость и этим изменил поле. Если мы не видим движения вакуума (или просто не хотим его признавать, например), то тогда предположение об изменении проницаемости в  $\gamma$  раз приведёт нас ровно к тем же выводам, что и кинематическая концепция движения со скоростью  $v_2$ . Вместо слов «поле ослабело в  $\gamma$  раз в результате движения вакуума со второй космической скоростью», можно сказать «поле ослабело в  $\gamma$  раз в результате увеличения диэлектрической проницаемости вакуума в  $\gamma$  раз». Удивительное дело, движение вакуума оказывается *эквивалентно* изменению его диэлектрической проницаемости и наоборот. Так движется он «на самом деле» или просто меняет свои диэлектрические и магнитные свойства? А невозможно установить! Потому, что вакуум (эфир, мировая среда) – *не вещество*. Нет прямых и привычных нам способов определить его скорость или ускорение. На нём нет никаких «меток», за которыми можно следить.

Чтобы проиллюстрировать как обе эти концепции работают на практике, рассмотрим выражение для электромагнитной массы:

$$(13) \quad m_0 = \frac{\mu\mu_0 q^2}{8\pi r}$$

Где  $m_0$  – масса электрона,  $r$  – эффективный радиус,  $q$  – заряд, а  $\mu \equiv 1$ . Если считать, что электрон находится в движении со скоростью  $v$  относительно местного физического вакуума, то его эффективный радиус должен испытывать «Лоренцево сокращение» в  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  раз. А тогда (13) преобразуется очевидным образом:

$$(14) \quad m = \frac{\mu\mu_0 q^2}{8\pi r \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Видим привычный «релятивистский рост массы» со скоростью. А если считать, что нет никакой скорости, а просто относительная *магнитная* проницаемость  $\mu$  увеличилась в  $\gamma$  раз, под действием, например, источника тяготения, то получим:

$$(15) \quad m = \frac{\mu\gamma\mu_0 q^2}{8\pi r} = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

То есть ровно то же самое, что и в (14). Следует напомнить, что не нужно применять эти концепции одновременно, изменяя и радиус, и проницаемость. Либо скорость есть, тогда мы находимся в рамках *кинематической концепции* и надо вводить сокращение длин, замедление процессов и т.д., либо скорость равна нулю, тогда мы в рамках *концепции*

*сплошной неподвижной среды*, соответственно меняются параметры мировой среды и надо вводить рост относительной магнитной проницаемости, диэлектрической проницаемости, уменьшение скорости света и т.д.

И напоследок рассмотрим знаменитое выражение, связывающее энергию и массу:

$$(16) \quad E = mc^2$$

Мы уже установили, что если в какой-то момент «включить» «гравитационное поле» с достаточно большим потенциалом  $\Phi$  (с любой, пусть даже предельно малой напряженностью), то масса  $m$  увеличится в  $1 - \Phi$  раз. Но и скорость света  $c$  замедлится во столько же раз. Тогда квадрат скорости света  $c^2$  уменьшится в  $1 - 2\Phi$  раз. Следовательно, энергия в (16) должна уменьшится в  $1 - \Phi$  раз. Куда она ушла? В системе даже не появилось новых сил, поскольку гравитационное поле мы специально «включили» с исчезающе слабой напряженностью. Мы всего лишь изменили *параметр* среды, а не её энергию. Не должна измениться полная энергия, поскольку тело, свободно падающее на источник тяготения, является *консервативной* системой. Тогда остаётся полагать, что энергия (16) не изменяется, и, следовательно, в формуле (16) тогда должно стоять не  $c^2$ , а, скорее всего,  $c \cdot c_0$ . То есть:

$$(17) \quad E = msc_0$$

Где  $c$  - *местная* скорость света, обусловленная условиями в данной точке пространства, а  $c_0$  – мировая константа, *справочная* скорость света. И этот результат хорошо согласуется с «параметрической» концепцией: связь энергии и массы обусловлена в равной степени как свойствами всей Вселенной («справочная» скорость света), так и местными, локальными свойствами мировой среды («местная» скорость света). При таком подходе энергия сохраняется, вакуум никуда не двигается, а меняются только параметры местной мировой среды и, к сожалению, формула (16), которую пока принято считать незыблемой. И тогда нет никакой «гравитационной энергии» вообще, ни отрицательной, ни положительной. Гравитационная энергия становится чем-то вроде «энергии наклона» наклонной плоскости. Тело-то катится по наклонной, энергия изменяется. Но не наклонная плоскость её даёт или забирает, она всего лишь *направляет* в определенную сторону процесс преобразования энергии из потенциальной в кинетическую. Такой взгляд, хотя вполне согласуется с опытом, тем не менее вынуждает нас думать довольно непривычным образом. Вот почему «кинематическая» концепция гравитации как правило гораздо легче усваивается исследователями, чем «параметрическая» концепция. Но и та и другая, без сомнения, являются более «физическими», чем чисто геометрическая интерпретация ОТО.

И, наконец, приведем ещё один, наиболее простой и прозрачный вывод выражений для относительной магнитной и диэлектрической проницаемостей вакуума (в «поле тяготения») для тех, кто затрудняется с понятиями векторного потенциала и положениями обеих теорий относительности. Для этого возьмём простейший идеальный LC-контур в вакууме. Емкость  $C$  будем полагать вакуумным конденсатором без потерь, индуктивность  $L$  – просто отрезком сверхпроводника, замыкающим эту емкость (рис. 1). Возбудим этот контур, создав в нём гармонические колебания.

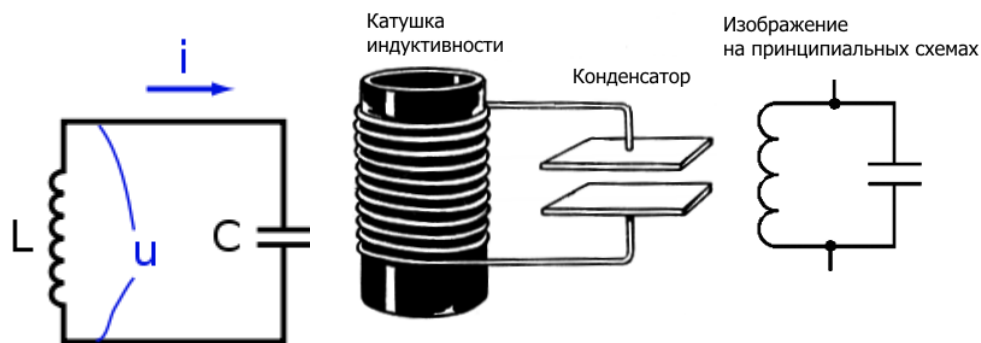


Рис. 1. Идеальный колебательный контур в вакууме

Такие колебания будут незатухающими, в силу отсутствия потерь в контуре. Идеальность нам понадобилась для того, чтобы иметь возможность не рассуждать о потерях энергии в контуре и их влиянии на частоту резонанса контура. Общеизвестны частота  $F$  и период  $T$  гармонических колебаний идеального контура:

$$(18) \quad F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, T = \frac{1}{F} = 2\pi\sqrt{LC}$$

Помним, что емкость конденсатора прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости среды между его пластинами  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ , а индуктивность любого проводника прямо пропорциональна магнитной проницаемости среды  $L = \mu\mu_0 \cdot K$  (где  $K$  – параметр, зависящий *только от геометрии* проводника). И там, и там среда у нас одна – вакуум. Соответственно, если мы поместим этот контур вблизи источника тяготения с гравитационным потенциалом  $\Phi$ , то как-то изменятся диэлектрическая и магнитные проницаемости вакуума и, соответственно, изменится *частота* (а значит и *период*) *колебаний в контуре*. Это явление хорошо известно, *экспериментально* проверено многократно, и носит неудачное название «гравитационное замедление времени». Выражается оно в том, что период колебаний в контуре должен возрасти, а частота нашего контура, соответственно, должна уменьшиться в «поле тяготения» с потенциалом  $\Phi$  в соответствии с формулой [8]:

$$(19) \quad F_{\text{грав}} = F_{\text{безграв}} \cdot (1 + \Phi), T_{\text{грав}} = T_{\text{безграв}} \cdot (1 - \Phi)$$

Напомним, что гравитационный потенциал есть величина всегда отрицательная. Сопоставьте (18) и (19), и вы увидите, что формула (19) возможна только в том случае, если  $L$  и  $C$  контура изменяются под действием тяготения одинаково в  $(1 - \Phi)$  раз. Только тогда корень квадратный из их произведения будет изменяться (в зависимости от  $\Phi$ ) точно также, как сами  $L$  и  $C$ . (конечно, чисто математически можно нафантазировать множество *разных* зависимостей емкости и индуктивности от гравитационного потенциала таких, что корень из их произведения даст результат (19), но все они будут страдать одной и той же проблемой: проницаемости  $\mu$  и  $\varepsilon$  будут иметь *неодинаковую* зависимость от  $\Phi$ , а это очень и очень сомнительно, исходя из всего опыта электродинамики). Ну, а коль скоро  $L$  и  $C$  прямо пропорциональны  $\mu$  и  $\varepsilon$ , то следовательно и они увеличиваются в  $(1 - \Phi)$  раз под действием тяготения. И это (о, чудо!) не меняет волнового сопротивления контура:

$$(20) \quad Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{const}$$

Соответственно, волновое сопротивление контура оказывается *инвариантом* относительно тяготения, несмотря на то что всё остальное в нём изменилось под действием этого самого тяготения. А это указывает на то, что и *волновое сопротивление самого вакуума (эфира, пленума, мировой среды) также не зависит от тяготения*. В то время как скорость света, показатель преломления, диэлектрическая и магнитная

проницаемости – зависят. Даже самое «время» и «пространство» (как считается в ОТО) зависят. А волновое сопротивление – нет. Это может означать, что мы нащупали самую глубинную суть мировой среды, то, что в ней действительно неизменно и вечно – её *волновые свойства*.

## Литература

1. Путилов К.А., Фабрикант В.А. Курс физики Том III. Оптика, атомная физика, ядерная физика. Москва, 1963 г. - 634 с. Часть 4-я. Оптика. с.405-407.
2. Masanori Sato. Gravitational effect on the refractive index: A hypothesis that the permittivity,  $\epsilon_0$ , and permeability,  $\mu_0$  are dragged and modified by the gravity. Honda Electronics Co., Ltd., 20 Oyamazuka, Oiwa-cho, Toyohashi, Aichi 441-3193, Japan.
3. Л. Б. Окунь, Понятие массы. (Масса. Энергия. Относительность). "Успехи физических наук" т. 158, вып. 3, 1989, стр. 511-530.
4. Т. И. Трофимова. Курс физики. 11-е издание стереотипное. М. Academia. 2006г. § 26. Космические скорости. с.51
5. Т. И. Трофимова. Курс физики. 11-е издание стереотипное. М. Academia. 2006г. § 37. Следствия из преобразования Лоренца. с.71
6. С. Кожинин. Отклонение частиц и световых лучей полем тяготения. Квант. 2004. №1, с.40-43.
7. Massimo Meneghetti. Introduction to Gravitational Lensing. p.8 f.(1.20)  
[http://www.ita.uni-heidelberg.de/~massimo/sub/Lectures/gl\\_all.pdf](http://www.ita.uni-heidelberg.de/~massimo/sub/Lectures/gl_all.pdf)
8. Е.И.Биченков, В.И.Тельнов. Лекции по теории относительности. ФМШ НГУ. Новосибирск. 1994 г., с.61, ф-ла (7.9)