

Комментарий к статье

**А.А. Логунова, М.А. Мествиришвили
и Ю.В. Чугреева "О неправильных формули-
ровках принципа эквивалентности"**

В.Л. Гинзбург, Ю.Н. Ерошенко

Статья А.А. Логунова и др. [1] начинается с утверждения, что, следуя ранним работам Эйнштейна [2, 3], принцип эквивалентности (ПЭ) обычно формулируют без оговорок, касающихся его локального характера. В качестве примера приводится, в частности, такая формулировка ПЭ из статьи одного из авторов [4]: "Согласно этому принципу все физические явления протекают совершенно одинаково в инерциальной системе отсчета K_g , в которой имеется однородное поле тяготения с ускорением силы тяжести \mathbf{g} , и в равномерно ускоренной системе K_a , движущейся с ускорением $-\mathbf{g}$ относительно инерциальной системы отсчета без поля тяготения". В [1] приводится также аналогичная формулировка из книги [5]. Подчеркивается, что в [2–5] "ни слова не говорится о локальности (малые пространственно-временные области)". Однако это явная и совершенно некорректная придирака. Действительно, работа [4] не посвящена специально теории относительности, а представляет собой методическую заметку под названием "Об излучении и силе радиационного трения при равномерно ускоренном движении заряда". Поэтому и не было необходимости как-то точно и в одном месте формулировать ПЭ. Вместе с тем, в той же статье [4] при обсуждении ПЭ (см. [4], с. 581) говорится: "Для построения общей теории относительности и, наоборот, в качестве следствия общей теории относительности необходимо и достаточно соблюдение эквивалентности "в малом", т.е. локально — в достаточно малой пространственно-временной области, когда поле тяготения можно считать однородным и постоянным"¹. В книге [5] локальность ПЭ также подчеркивается буквально на следующей же странице (с. 88) после формулировки ПЭ, приведенной в [1].

Что касается Эйнштейна, то в его статье 1907 г. [2], в которой было начато построение общей теории относительности, действительно рассматривается лишь однородное гравитационное поле. Но уже в статье [3], опубликованной в 1911 г., сделано такое замечание: "Конечно, нельзя *любое* поле тяжести заменить состоянием движения системы без гравитационного поля, точно так же, как нельзя преобразовать все точки произвольно движущейся среды к покою посредством релятивистского преобразования". Как нам кажется, уже это замечание свидетельствует о понимании того факта, что в случае произвольного поля для применения ПЭ нужно рассматривать лишь области, в которых поле можно считать однородным. Так или иначе, в дальнейшем Эйнштейн неоднократно давал понять, что ПЭ

¹ Как справедливо подчеркнул Фок [6], в действительности "локальный характер принципа эквивалентности следует понимать в пространственном смысле: в достаточно малом объеме (например, внутри спутника) поле тяготения может быть компенсировано ускорением не только для малых, но и для больших промежутков времени".

имеет локальный смысл. Достаточно сослаться хотя бы на брошюру [7], в которой рассуждения ведутся для некоторого "ящика", часто именуемого в литературе "лифтом Эйнштейна".

Литература, посвященная теории относительности, огромна, и мы не беремся утверждать, что никто и никогда не предлагал формулировать ПЭ как относящийся к бесконечно протяженному однородному гравитационному полю и безграничной равномерно ускоренной системе отсчета. Очевидно, вместе с тем, что бесконечное однородное поле и безграничная равномерно ускоренная система отсчета не являются физически реализуемыми объектами, и то, что в этих условиях могло бы происходить, не допускает какой-либо проверки — подтверждения или опровержения, т.е. лежит за пределами физики. Между тем, А.А. Логунов и др. в своей статье [8] рассматривают электромагнитное поле именно в безграничной равномерно ускоренной системе отсчета. При этом авторы [1, 8] стремятся показать, что ПЭ в электродинамике несправедлив.

Нам, однако, нет никакой нужды обсуждать здесь эти вопросы, поскольку мы рассматриваем ПЭ только в его четкой локальной формулировке, приведенной, например, в книге Паули [9] и воспроизводимой в [10], а частично и в [1]. Кстати сказать, эта формулировка не только не противоречит принадлежащей Эйнштейну формулировке ПЭ [11], которую предпочитают А.А. Логунов и др. [1, 8]. По сути дела, речь здесь идет о том, что в силу ПЭ произвольное гравитационное поле полностью описывается метрическим тензором $g_{\mu\nu}$. Об этом же пишет, например, и Паули (см. [9], с. 202).

Применение ПЭ к электродинамике породило, однако, некоторый парадокс, касающийся излучения заряда в системах K_g и K_a . Дело в том, что на первый взгляд кажется, что заряд в системе K_g излучать, конечно, будет, но в системе K_a излучать не должен, ибо он не ускорен относительно инерциальной системы K . Системы K_g и K_a представляются, таким образом, неэквивалентными, т.е. ПЭ кажется нарушенным. Разрешению этого парадокса, выяснению того факта, что здесь "все в порядке" и ПЭ удовлетворяется, был посвящен целый ряд статей [12–14]. В [4] соответствующие аргументы были повторены, а в связи с непониманием вопроса, отразившемся в статье [8], мы в работе [10] стремились еще раз, причем более подробно, доказать справедливость ПЭ в электродинамике. Мы продолжаем считать, что нам это удалось². Что же касается возражений А.А. Логунова и др. [1], то они, в основном, базируются на недоразумении или, точнее, на нежелании этих авторов [1, 8] понять, что же подразумевается в [4, 10, 12–14] под излучением.

² Формула (57a) из [1] справедлива, но в рассматриваемой нами малой области, где $av/c \ll 1$, переходит в нерелятивистскую формулу (23) из нашей статьи [10]. При этом нужно иметь в виду, что при использовании формулы (20) из [10] для получения формулы (23) нужно интегрировать по поверхности постоянной фазы, а не по сфере (21), как это ошибочно было сделано в нашей статье [10]. Если же интегрировать по поверхности сферы, то получается указанная в [1] ошибка в 2 раза. Таким образом, приведенный в [1] расчет величины P лишь подтверждает расчет, приведенный нами в [10].

Пользуемся возможностью отметить, что в [10] не была напечатана ссылка [19]: Беллони Л., Рейна Ч., *Эйнштейновский сборник 1984–1985* (М.: Наука, 1986), с. 201.

Именно, как это многократно подчеркивалось в [4, 10, 12–14], заряд считается излучающим, если поток P вектора Пойнтинга через окружающую заряд поверхность отличен от нуля. При таком определении, а оно разумно и оправданно, равномерно ускоренный заряд излучает, хотя в этом случае, как известно, нет волновой зоны и поэтому нельзя говорить о появлении фотонов. Между тем, А.А. Логунов и др. под излучением понимают только поле в волновой зоне (в частности, они пишут [1]: "Никакой волновой зоны в данной задаче не может быть, а следовательно, нет и излучения"). В вопросе об излучении при отсутствии волновой зоны как раз и заключен источник многолетней дискуссии, посвященной рассмотрению равномерно ускоренного заряда на всем интервале времени (см. в особенности [14]). Если же считать ускорение происходящим лишь на некотором конечном интервале, то все сразу же становится на свои места (см., например, [4]).

Для доказательства ПЭ нужно продемонстрировать, что в системе K_g и в системе K_a значения потока P (или сами электромагнитные поля) одинаковы. Это и показывается в [10]. При этом, поскольку речь идет о рассмотрении лишь локальном, т.е. в малой области, думать о волновой зоне и т.п. не приходится.

Заметим также, что авторы статьи [1] считают неверной используемую нами формулировку ПЭ (см. [9, 10]) и на том основании, что мыслимы ситуации (взаимодействия), в которых тензор кривизны нельзя исключить никаким преобразованием координат даже в сколь угодно малой области. Да, это правильно, и в таких условиях ПЭ действительно будет несправедлив в том смысле, что даже сколь угодно малая неоднородность гравитационного поля могла бы сказываться на наблюдаемых эффектах. Но это только подчеркивает, что ПЭ является физическим принципом, допускающим проверку — подтверждение или опровержение. Такой проверкой физики и занимаются, затрачивая на это гигантские усилия [15]. В пределах достигнутой огромной точности ПЭ подтверждается. Что же касается классической электродинамики, то, как сказано, справедливость

ПЭ в отношении поведения электрического заряда в системах K_g и K_a доказывается прямыми вычислениями [10]. Недавно справедливость принципа эквивалентности в электродинамике в применении к электрическому заряду была продемонстрирована также в [16].

В заключение мы хотим согласиться с А.А. Логуновым, М.А. Мествиришвили и Ю.В. Чугреевым [1] в том отношении, что "точки зрения высказаны, и вдумчивый читатель сам может решить, что правильно, а что неправильно". Поэтому дальнейшая дискуссия с А.А. Логуновым представляется нам бессмысленной.

Список литературы

1. Логунов А А, Мествиришвили М А, Чугреев Ю В *УФН* **166** (1996)
2. Einstein A *Jahrb. d. Radioaktivität u. Electronik* **4** 411 (1907) [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. I (М.: Наука, 1965) с. 65]
3. Einstein A *Ann. Phys.* **35** 898 (1911) [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. I (М.: Наука, 1965) с. 165]
4. Гинзбург В Л *УФН* **98** 569 (1969)
5. Зельманов А Л, Агапов В Г *Элементы общей теории относительности* (М.: Наука, 1989)
6. Фок В А *Теория Эйнштейна и физическая относительность* (М.: Знание, 1967). См. также: Фок В А *Теория пространства, времени и тяготения* (М.: Физматгиз, 1961) § 61
7. Einstein A *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie* (Braunschweig, 1920) [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. I (М.: Наука, 1965) с. 530]
8. Логунов А А, Мествиришвили М А, Чугреев Ю В *Теор. и мат. физ.* **99** 121 (1994)
9. Паули В *Теория относительности* (М.: Наука, 1991)
10. Гинзбург В Л, Ерошенко Ю Н *УФН* **165** 205 (1995)
11. Einstein A *George A. Gibson Foundation Lecture* (Glasgow, 1933) [Русский перевод: Эйнштейн А *Собрание научных трудов* Т. II (М.: Наука, 1966) с. 403]
12. Fulton T, Rohrlich F *Ann. of Phys.* **9** 499 (1960)
13. Rohrlich F *Nuovo Cimento* **21** 811 (1961); *Ann. of Phys.* **22** 169 (1963)
14. Boulware F *Ann. of Phys.* **124** 169 (1980)
15. Уилл К *Теория и эксперимент в гравитационной физике* (М.: Энергоиздат, 1985)
16. Sigal A K *General Relativity and Gravitation* **27** 953 (1995)