объединенный
институт
ядерных
исследований
дубна

Д2-92-446

Неганов Б.С.

О НАРУШЕНИИ ПРИНЦИПА ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ПРИ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ СПИНОВОЙ ПРЕЦЕССИИ ДВИЖУЩИХСЯ ЧАСТИЦ

Направлено в журнал «Теоретическая и математическая физика»

1992

Из области "невероятное,но очевидное". Читать на сон и бегло не рекомендуется.

Рецензент

ВВЕДЕНИЕ

Одно из важнейших направлений в области фундаментальных исследований на современном кризисном этапе развития связано с самой тщательной проверкой исходных положений и узловых моментов существующей теории. Стержневым положением её является,безусловно, принцип относительности, так как воздвигнутая на его базе специальная теория относительности, отражающая свойства пространства-времени,играет в настоящее время роль некоторого полупрозрачного экрана, определяющего видимую картину мира, предстоящую перед взорами исследователей, жаждущих истины. В связи с этим самая тщательная проверка принципа относительности, сколько бы ни мала была доля сомневающихся в его непорочности, представляется не в меньшей степени оправданной, чем и других фундаментальных положений, для проверки лишь части которых создаётся и уже работает целая индустрия. Эта важнейшая задача до последнего времени, однако, сильно сдерживалась из-за отсутствия предложения подходящего опыта, способного в рамках признания действия преобразований Лоренца, справедливость которых доказана всем предыдущим опытом, подвергнуть тем не менее сомнению возможность выполнения принципа относительности.

После длительных систематических поисков нарушение принципа относительности и открывающаяся в связи с этим возможность измерения абсолютной скорости Земли были всё же обнаружены в работе [1]. В ней было показано, что принцип относительности в случае измерения локальной скорости спиновой прецессии релятивистских частиц, движущихся по криволинейной траектории в электромагнитном поле, не может быть выполнен из-за добавочной томасовской прецессии [2], локально не описывающейся ковариантным образом относительно группы специальных преобразований Лоренца. Там же было показано, что это не приводит к какому либо противоречию с известными прецизионными измерениями прецессии спина заряженных лептонов [3] в силу того, что усредненная за период обращения частицы в поле скорость спиновой прецессии оказывается все же ковариантной относительно данных преобразований, и поэтому принцип относительности при подобных глобальных измерениях еще строго выполняется.

В последующей работе [4] был произведен дополнительный анализ ситуации и детально рассмотрены некоторые предварительные варианты постановки конкретных экспериментов в наземных условиях, способных подтвердить или опровергнуть обнаруженную несовместимость прецессии спина с принципом относительности при локальных измерениях. В ней было отмечено, что нарушение принципа относительности в конечном итоге связано с отсутствием групповых свойств у общих преобразований Лоренца без вращений [2], прямым следствием которых и является само явление томасовской прецессии. Именно в наличии данного вращения и выражается нарушение групповых свойств этого вида преобразований. Но поскольку за групповыми свойствами скрыта определённая симметрия, физическое проявление которой и заключается в существовании принципа относительности, нарушение последнего не должно представляться в этом случае чем-то невероятным, а скорее, вполне логичным и закономерным следствием отражающей реальную действительность математической структуры теории. В этом случае специальная теория относительности Эйнштейна, основанная исключительно на данном принципе, не может считаться далее внутренне непротиворечивой из-за нарушения этого вида симметрии в природе и должна быть, следовательно, заменена некоторой более общей теорией, в которой ограниченный принцип относительности выступал бы лишь в роли некоторого следствия, а не первопричины и основы всей теории.

Нарушение принципа относительности, выражающего равноправие всех инерциальных систем отсчета, означает возможность выделения среди них привилегированной, то есть покоящейся по отношению к физическому вакууму, выступающему в этом случае в роли той материальной основы, физические свойства которой и предопределяют как величину предельной скорости распространения любых взаимодействий и возмущений в форме сигналов, так и свойства и поведение всех форм наблюдаемой материи. Такая ситуация требует, конечно, полного пересмотра всей метрической аксиоматики классической механики,а начало ему и было положено еще самим Лоренцем в начале нашего века. Но столь радикальный путь во времена Лоренца был, конечно, обречён, главным образом из-за отсутствия в его теории указания физического метода обнаружения покоящейся по отношению

к эфиру*) системы отсчёта, в которой могли быть сформулированы метрические начала новой механики, и выглядевшей весьма искусственной для того времени идеи всеобщего продольного сокращения, замедления скорости всех процессов и возрастания инертной массы тел в движущихся системах отсчёта, то есть полного изменения их физического масштаба. Хотя в другой форме, опирающейся на принцип относительности и скрывающей абсолютный характер этих же изменений, всё это и пришлось в неявном виде скоро принять как факт, пожертвовав из прежнего набора аксиом лишь априорным понятием абсолютной одновременности. Однако такой выход из положения, сложившегося в физике после получения удивившего всех отрицательного результата фундаментального опыта Майкельсона-Морли, представлял собою все же вынужденную временную полумеру с идеологией, уводившей от лобовой атаки, затянувшейся, к сожалению, почти на век.

Но как показывает всемирный опыт, история развития, творимая *homo sapiens* вплоть до наших дней, избегает прямых путей, предпочитая им различной величины зигзаги. Вероятно, это связано со способом коллективного мышления, склонного к периодической коагуляций, проявляющейся в возникновении той или иной моды. Неудивительно, если и в фундаментальной науке мы подошли к той черте, за которой опять предстоит совершить крутой поворот и вернуться на путь познания сущности вещей, а не только формы их проявления,и восстановить утраченную за прошедшее столетие ясность физического мышления;**) а именно на путь познания основы всего - физического вакуума-эфира, намеченный еще Лоренцем и его великими предшественниками, начиная с Ньютона и Декарта.

За прошедшее время с момента появления упомянутых выше работ мною не было получено каких-либо замечаний по существу этих работ и в то же время не последовало и сколь-либо адекватной поставленной задаче реакции. В связи с этим я вынужден вновь вернуться к указанной проблеме и попытаться изложить её на несколько ином и,возможно, более понятном и наглядном уровне с тем, чтобы всё же исключить какое-либо недопонимание или сомнение в правильности полученного ранее результата и устранить повод для дальнейшего его замалчивания, являющегося всё же недопустимым по отношению к фундаментальной науке.

Основные недоразумения, обусловленные как чисто формальным вос-

*) *Этот термин, который по традиции используется ещё лишь работниками радио и телевидения, конечно, лучше отражает сущность понятия, чем современное словосочетание "ФИЗИЧЕСКИЙ ВАКУУМ", без которого любая теория теперь всё ~~же~~ не полна.*

**) *Теперь, например, мы дошли до того, что "мыслим" существование и распространение поля сил в пустом пространстве. Исаак Ньютон, к примеру, этого ещё не мыслил не только сам, но, как известно, не мог себе представить и другого здравомыслящего, способного себе это представить.*

приятием основ существующей теории, так и традиционно принятой формой её изложения, возникают из-за забвения условного характера описания физических процессов, происходящих в движущихся системах отсчета, отмеченного еще Пуанкаре [5]. По существу, эта условность начинается с условности самого понятия неподвижной системы отсчёта, чем немало гордится существующая теория, закрывая глаза на то, что эта условность и приводит в конечном итоге к такой же условности и большинства утверждений теории относительности в силу условного в этом случае характера определения одновременности. Только в действительно неподвижной системе отсчёта одновременность, определяемая любым симметричным по физическим условиям процессом, является достоверной на современном уровне знания свойств пространства, и, следовательно, только в такой системе любые измерения и заключения могут носить безусловный абсолютный характер. Несмотря на это, подавляющее большинство современных физиков, особенно среди теоретиков, уверено, например, в абсолютной изотропности процессов, протекающих во всех системах, воспринимая это почти как прямой опытный факт, совершенно не задумываясь над тем обстоятельством, что такое вульгарное представление находится в прямом противоречии с фактом различной одновременности в этих системах, фиксируемой преобразованиями Лоренца, которая физически может возникать лишь вследствие действительной анизотропии процессов в движущихся системах отсчёта. При отсутствии такой анизотропии физически могла существовать лишь единая для всех инерциальных систем одновременность*), не отличимая от той, которая предполагалась и в теории дальнодействия. Другими словами, относительный характер принятой одновременности не является каким-то самостоятельным свойством пространства-времени, как принято теперь считать, а является лишь следствием нашего соглашения считать одновременным то, что таковым по существу не является. Но благодаря введению этого нового условного понятия сложное анизотропное описание явлений в движущихся системах в рамках единого мирового времени можно заменить до определённых границ непротиворечивым, условным, но зато весьма простым изотропным описанием, и, поверив в него, мы становимся жертвами собственной выдумки. Если бы принцип относительности оказался при этом абсолютно строгим утверждением, что, по-видимому, всё же исключается, не было бы ни малейшей возможности отличить заведомо условное от действительного, во что и поверил в конце своей жизни Пуанкаре. Но что может быть ужаснее для познающего субъекта? Природа превратилась бы для нас в закрытый чёрный ящик без малейшей возможности проникнуть внутрь его и узнать наконец сущность вещей, а не ограничивать себя описательной стороной дела – приведением наших ощущений в соответствие с опытом как единственной и конечной целью науки.

Современный ортодоксально воспитанный читатель настолько привык к положению о равноправии всех инерциальных систем отсчёта, что для избежания различного рода недоразумений приходится, как показал опыт, делать пояснения и самого тривиального характера. Сама постановка вопроса о проверке выполнимости принципа относительности вынуждает, конечно, различать две физические ситуации, одна из которых реализуется в неподвижной по отношению к вакууму системе отсчёта, а другая воспроизводится в движущейся по отношению к ней системе при эквивалентных физических условиях с точки зрения движущегося совместно с этой системой наблюдателя. Физические условия, таким образом, одинаковы лишь с точек зрения собственных наблюдателей этих двух систем отсчёта, а не любого из них в отдельности. Так, для наблюдателя в неподвижной системе, в которой обе эти ситуации формируются и анализируются, эти условия, конечно же, не являются одинаковыми, как, разумеется, и для второго наблюдателя. Определённая трудность для правильного восприятия заключается также в том, что из существующего опыта такой системы мы пока не знаем и поэтому привыкли считать любую инерциальную систему неподвижной, что, однако, верно лишь в рамках действия принципа относительности. Если же последний нами и проверяется, то прежде всего следует отказаться от жонглирования этими понятиями и до вынесения заключения, напрягая чуть своё воображение, всё же строго различать эти две системы и создаваемые в них упомянутые выше ситуации. Удивляться при этом следовало бы скорее не тому, что эти различные по физическим условиям ситуации могут и по измерениям собственных наблюдателей оказаться всё же различными, а тому, что они, как правило, оказываются тождественными, за что и несут безраздельную ответственность лишь групповые свойства преобразований Лоренца и стоящий за ними принцип относительности. Но если в исследуемом явлении прямым образом замешаны и преобразования, не обладающие такими свойствами, то вопрос о тождественности создаваемых ситуаций и, следовательно, о выполнимости принципа остаётся, по крайней мере, открытым и должен быть исследован аналитическим методом, опирающимся не на форму, а на действительное содержание существующей теории.

Таким образом, мы не можем полагаться на равноправие инерциальных систем как изначальный принцип, очевидный лишь в рамках метричес-

*) *Действительно, синхронизация с помощью симметрично распространяющегося сигнала отличается от мгновенной лишь сдвигом начала отсчёта времени, легко устранимым при встрече любой пары часов, принадлежащих разным системам отсчёта.*

ких аксиом классической механики и строго вытекающий из наличия групповых свойств у всей совокупности преобразований Галилея. Решение вопроса о полном равноправии всех инерциальных систем отсчёта есть прерогатива прежде всего новой механики. Но её ещё никому до сих пор так и не удалось создать, если, конечно, не принимать за таковую задачи о частицах во внешнем поле, одной из которых мы ниже и пользуемся. За этим фактом скрывается, конечно, не досадная случайность, а, скорее, невозможность навязать природе чуждые духу причинности представления. Для создания новой механики необходима прежде всего новая четкая метрическая аксиоматика, а не та двусмыслица, которую мы пока в состоянии ей навязать, исходя из старой идеи - принципа равноправия. Равноправие может быть лишь следствием, а не исходной и всё определяющей позицией. Не следует забывать, что сначала было всё же СЛОВО, а потом ПРАВО, а поэтому равноправие следует обеспечивать, а не декларировать.

Но где это пресловутое равноправие в реальной, как в неживой, так и живой природе? В ней даже левое не равноценно правому. Не существует никакого равноправия и для населяющих Мир частиц и их античастиц. Первые живут уже миллиарды лет, а вторые лишь мгновения. То же неравенство заложено и в электродинамике Максвелла. Симметрия относительно источников полей нарушена в ней изначально. И нет конца этим "несправедливостям" в реальном мире. Природа не терпит не только ПУСТОТЫ, но и СИММЕТРИИ. Видимо, лишь в нарушении симметрии залог её существования и устойчивости. Так же обстоит дело и с симметрией, которую условно можно назвать пока кинематической и проявляющейся в форме принципа относительности, или,точнее,принципа равноправия, ибо это утверждение за ним и стоит. Да, в классической механике такая симметрия ещё не нарушена, но эта механика и соответствует идеализированному пространству, а не реально существующему, а коли так, то и тут надежда на особое предрасположение природы к этой симметрии также призрачна. А между тем весь образ современного мышления построен пока на этой призрачной идее, в том числе и сами преобразования Лоренца. Но, как известно из области логики, из неправильности предпосылки ещё не следует неправильность следствия. Преобразования Лоренца справедливы, но роль их значительно шире и глубже самого принципа, и они, конечно, могут быть получены и помимо этого принципа.*)

Что же касается проверки самого принципа, этой повивальной бабки современного мировоззрения, освобождающего нас от довольно утомите-

*) *Например, весьма близкие преобразования были получены Фогтом ещё в 1877г, исходя из упругой теории света. В полном объёме преобразования были получены впервые Лармором в 1900г.*(Aether and matter, Cambridge.)

льной аналитической работы по расчёту всех последствий поступательного движения системы отсчёта и получения конечного результата в величинах движущейся системы, то с полной уверенностью, как это ни покажется странным, можно утверждать, что пока ни одного специального опыта на самом деле так и не было поставлено. В наше время им может считаться лишь тот, при постановке которого безоговорочно исходят из действия лоренцевских преобразований, а не галилеевских, как было во всех прежних, и лишь действие первых из них они и способны были доказать, но не более того, сколько бы их ни совершенствовали. Таким образом, ситуация с экспериментальной проверкой весьма напоминает ту, которая существовала и накануне обнаружения несохранения четности, и такой же результат нас ожидает, согласно расчёту, в будущем, что и попытаемся ещё раз доказать, исходя из всего имеющегося опыта.

1. ЭЛЕМЕНТАРНЫЙ ВЫВОД УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СПИНА В НЕПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ ОТСЧЕТА И ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ИСПОЛЬЗУЕМОГО ФОРМАЛИЗМА

Для нашей цели необходимым и достаточным будет рассмотрение спиновой прецессии в частном случае движения заряженной частицы в постоянных и однородных скрещенных полях, магнитном **B** и электрическом **E**, в плоскости, ортогональной к направлению магнитного поля.

Как известно, прецессия спина движущейся в электромагнитном поле по некоторой криволинейной траектории частицы обусловлена двумя совершенно независимыми причинами [2,3]:

а)взаимодействием внешнего электромагнитного поля с магнитным моментом частицы,

б)томасовским поворотом спина, обусловленным движением по криволинейной траектории.

Первый механизм -электромагнитный,или ларморовский,определяется величиной отношения магнитного момента к механическому, т.е.g-фактором частицы и величиной магнитного поля в собственной системе покоя частицы $\mathbf{B}_o$. Этот член прецессии для покоящейся частицы имеет вид:

$$\omega_L = \frac{g}{2}\cdot\frac{e\,\mathbf{B}_o}{m\,c} ,$$

где e-заряд, а m-масса покоя частицы.

В случае движущейся частицы в скрещенных полях **E** и **B** в плоскости, ортогональной к направлению магнитного поля, ковариантное выражение для электромагнитного члена прецессии имеет вид:

$$\omega_L = \frac{g}{2}\cdot\frac{e}{mc}\cdot(B - [\vec{\beta}\cdot\vec{E}]) \ , \qquad (1)$$

где $\beta = v/c$ -скорость частицы в единицах скорости света.

Чтобы убедиться в этом, достаточно перейти в систему покоя частицы. Для этого нужно преобразовать компоненты поля и выразить частоту прецессии в собственном времени частицы, то есть умножить все выражение на лоренц-фактор $\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2}$. Выражение в круглых скобках есть, по существу, уже магнитное поле в системе покоя частицы, разделенное лишь на γ, т.к. в соответствии с лоренцевскими преобразованиями компонентов поля

$$B_o = (B - [\vec{\beta}\cdot\vec{E}])\cdot\gamma \ .$$

Поэтому частота прецессии в системе покоя частицы в ее собственном времени есть

$$\omega_L' = \omega_L\gamma = \frac{g}{2}\cdot\frac{eB_o}{mc\gamma}\cdot\gamma = \frac{g}{2}\cdot\frac{eB_o}{mc} \ ,$$

т.е. выражение (1) действительно ковариантно относительно преобразований группы Лоренца.

Целесообразно теперь всё же несколько углубиться в физическую суть используемого формализма и написанных выще выражений. Для этого достаточно рассмотреть самый простой пример прямолинейного движения частицы в скрещенных полях **E** и **B**, которое может происходить при условии равенства и противоположности сил, действующих на движущуюся частицу со стороны обеих составляющих поля, то есть когда $e\vec{E} = -e[\vec{\beta}\cdot\vec{B}]$. Сокращая заряд, видим, что при условии $E=-[\vec{\beta}\cdot\vec{B}]$ в силу ортогональности векторов **E** и **B** результирующая сила со стороны поля будет равна нулю, если вектор β ортогонален обеим составляющим поля, и, следовательно, частица в этих условиях будет совершать чисто инерциальное движение, как бы не замечая присутствия поля. Но это верно лишь по отношению к её скорости, но не поведению спина. На магнитный момент μ, связанный со спином s соотношением $\vec{\mu} = eg\vec{s}/2mc$, по-прежнему будут действовать оба компонента поля, создавая два противоположных по направлению момента сил $p_1=[\vec{\mu}\vec{B}]$ и $p_2=-[\vec{\mu}[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]]$, и результирующий момент будет равен $p=[\vec{\mu}\vec{B}]-\beta^2[\vec{\mu}\vec{B}]=[\vec{\mu}\vec{B}]/\gamma^2$. Благодаря гироскопическому эффекту этот момент сил будет вызывать прецессию спина вокруг направления магнитного поля **B** с угловой скоростью $\omega_L=geB/2mc\gamma^2$, к чему и сводится выражение для ларморовского члена прецессии спина движущейся частицы (1), приведённое выше, при подстановке в него значения $E= -[\vec{\beta}\cdot\vec{B}]$, соответствующего рассматриваемой нами задаче. С другой стороны, равенство действующих на движущийся заряд сил нулю есть факт абсолютный, то есть не может зависеть от выбора системы координат, в которой рассматривается движение. Поэтому, вводя движущуюся совместно с частицей систему, факт отсутствия сил, действующих на покоящийся в этой системе заряд со стороны поля, можно, конечно, чисто формально объявить как итог исчезновения в этой системе электрического поля при одновременном изменении и магнитного, и массы частицы. Но только сумасшедшие могут считать, что от одного введения подвижной системы координат физическое поле, на создание которого была затрачена вполне определённая работа, как и на приведение частицы в состояние движения, может как-то измениться или даже бесследно исчезнуть. Но оказывается, врождённого релятивиста, как и верующего богослова, невозможно убедить в отсутствии в природе чудес, так упрощающих видение нами окружающего мира. Конечно, от самого введения только подвижной системы координат в природе пока ещё абсолютно ничего не изменилось. Однако какие-то изменения в принципе могут произойти при заселении её измерительными приборами, лишь в результате которого она превращается уже в систему отсчёта, и величину их может показать только опыт. Поскольку опять же ни линейки, ни часы, и даже пробные заряды к состоянию поля никакого отношения иметь не могут, то все изменения результатов измерений в созданной системе отсчёта логически можно отнести лишь за счёт изменения самих приборов и их эталонов, на приведение в состояние движения которых пришлось совершить реальную работу. Первоначально при создании реальных полей совершалась, по существу, работа с помощью зарядов над пространством, вызывающая изменение его состояния в некоторой ограниченной области, а при изменении состояния движения приборов в пространстве вторично совершалась работа и опять же над пространством, но выразиться на этот раз она могла, конечно, не в форме изменения его состояния, а в виде изменения всех свойств приборов, как ответная реакция того же пространства. Если тут какое-то чудо и есть, то оно, безусловно, в существовании самого пространства, над конструированием которого немало потрудились в своё время Фарадей и Максвелл, создавая электромагнитную теорию на века, сделавшую в итоге нашу жизнь теперь, хотя пока и не для всех, столь удобной и приятной. Удобно, конечно, и то, что рассматриваемую комбинацию полей **E** и **B** в новых условиях измерений можно заменить одним эффективным полем $B_o=B/\gamma$ и *з а б ы т ь* о проделанной работе над пространством и её метрических последствиях, переложив все дальнейшие заботы, как обычно все теперь и делают, на "плечи" преобразований Лоренца, автоматически учитывающих все эти метрические изменения как проявления упомянутых свойств пространства. Действительно, найденное выше значение частоты прецессии спина в результате воздействия обоих компонентов поля **E** и **B**, измеренное по движущимся часам, окажется в γ раз больше. С другой стороны, измерение данной частоты для покоящейся частицы является пока наилучшим методом измерения величины магнитного поля. Так как относительно новой системы отсчета частица покоится и электрическое поле непосредственно не проявляется, то движущемуся совместно с ней наблюдателю ничто пока не мешает принять измерение этой частоты за метод определения величины магнитного поля в его системе отсчёта, что он и делает, получая значение $B_o = B/\gamma$. Таким образом, когда мы говорим и пишем, что значения компонентов поля относительны, то есть способны меняться от системы к системе для одного и того же поля, то это не более чем современный научный жаргон, за которым на самом деле скрывается весьма сложная динамика. Преобразования Лоренца, которыми не сложно научиться пользоваться , избавляют нас от всех этих забот, но эта палка тоже с двумя концами, так как упрощая с её помощью своё мышление и принимая жаргон за действительность, можно разучиться при этом и правильно логически и физически мыслить. Тут, отвлекаясь несколько от нашей темы, необходимо сделать всё же некоторые пояснения.

Если бы измерительные приборы реально не изменялись, как это считалось в классическое время и как некоторые склонны под гипнозом принципа относительности считать до сих пор и упорно внушать эту мысль и другим, замораживая и их мышление, невозможны были бы все те физические результаты, которые мы имеем, в том числе и основной из них – *независимость средней ОТНОСИТЕЛЬНОЙ скорости распространения света в прямом и обратном направлениях* (единственно непосредственно подтверждаемый опытом) от состояния движения измерительной системы в пространстве при одновременной независимости скорости света от данного и любого другого движения и, следовательно, при абсолютном её постоянстве. Без этих метрических изменений данная величина оказалась бы неизбежно в γ^2 раз меньше в движущейся системе и о принципе относительности не могло быть и речи. Лишь благодаря лоренцевскому сокращению и замедлению темпа времени эта величина оказывается численным инвариантом в собственном масштабе длины и времени движущейся системы отсчёта. Только в этом случае для времени запаздывания Δt светового сигнала при распространении в прямом и обратном направлениях относительно движущейся базы $L=L_o/\gamma$

$$\Delta t=\Delta\tau\gamma=L/(c+v)+L/(c-v)=2L/c(1-\beta^2)=2L\gamma^2/c ,$$

где c и v – скорости, измеряемые в неподвижной системе отсчёта, и, следовательно, $\bar{c}'=2L_o/\Delta\tau = 2L\gamma/\Delta\tau = c$. Самым удивительным в этой истории является, пожалуй, то, что многие до сих пор так и не уяснили себе смысла нового закона сложения скоростей и продолжают, спекулируя им, сбивать с толку ещё и доверчивые подрастающие поколения. Как ни велик Альберт Эйнштейн, но и он не в состоянии был отменить ранее установленные законы векторного исчисления, и если сумма векторов выглядит иначе, то это означает лишь, что они измерены всё же в разных единицах. Очевидно, как и при сложении фунтов с килограммами, скорости тоже следует прежде"выравнивать",что и отражает новый закон сложения. Так, например, если требуется найти результирующую скорость частицы в неподвижной системе по данной величине её $\beta_л$ в движущейся со скоростью β_o системе отсчёта, то в случае взаимной ортогональности этих векторов величина $\beta_л$, измеренная уже в единицах длины и времени неподвижной системы, будет просто в γ_o раз меньше и, следовательно, сумма векторов в этой системе по теореме Пифагора будет $\beta=(\beta_o^2+\beta_л^2/\gamma_o^2)^{1/2}$, к чему, разумеется, приводит и общая формула сложения скоростей, используемая в этом случае. В произвольной ситуации для "выравнивания в правах", то есть нахождения второго вектора в масштабе исходной системы, требуется, конечно, дополнительный учет продольного сокращения и сдвига одновременности в движущейся системе, что в случае коллинеарных векторов сводится к умножению вектора уже на множитель $1/\gamma_o^2(1\pm\beta_o\beta_л)$, и для суммы векторов в исходной системе получается тогда знакомое всем выражение:

$$\beta = \beta_o\pm\beta_л/\gamma_o^2(1\pm\beta_o\beta_л)=(\beta_o\pm\beta_л)/(1\pm\beta_o\beta_л).$$

Таким образом, мы имеем дело не с новым законом сложения как таковым, а со сложением векторов, определённых в различных метрических масштабах[7]. Но именно эта важнейшая для понимания сути сторона дела как раз и опускается из виду. Более того, спекулируя на этом, пытаются убедить, что сумма любых векторов не может быть больше скорости света, и вроде бы вопрос о её величине в движущейся системе этим и исчерпан. Но, во-первых, эта сумма не относится к движущейся системе, а во-вторых, смысла в этом не более, чем в утверждении, что сумма двух величин В и С-В не больше С, потому что прибавляемая величина c' в движущейся системе при переводе в единицы неподвижной системы есть не что иное, как величина относительной скорости света по отношению к движущейся системе и равна просто $c\mp v$, как и должно быть в силу независимости скорости света от скорости источника. Используя это естественное значение относительной скорости, можно сразу получить выражение для сдвига одновременности в движущейся системе, учитываемого преобразованием Лоренца для времени. Действительно, для разности времён прихода сигнала из средней точки движущейся базы $x=x'/\gamma$ имеем:

$$\Delta t = x'/2\gamma(c-v) - x'/2\gamma(c+v) = x' v\gamma/c^2 ,$$

которая и содержится в преобразовании Лоренца для временной координаты помимо члена $t'\gamma$, учитывающего изменение масштаба времени, приводя в итоге ещё и к линейной зависимости её от пространственной, что и послужило поводом для введения четырёхмерного формализма и философских разговоров о неразделимости пространства-времени. Таким образом, теория в неявном виде опирается на правильное значение относительной скорости света в заданном направлении, но публично выдает её за инвариант, каковым она в отличие от её среднего значения на самом деле, конечно, не является. Игра ведётся на отрицательных результатах опыта Майкельсона и других, не имеющих никакого отношения к измерению этой величины, не измеряемой на самом деле ни в одном эксперименте из-за отсутствия в природе мгновенных сигналов, необходимых в подобных измерениях, на чём порочный круг и замыкается, так как лишь такие сигналы, помимо здравого рассудка, только и способны восстановить истину.

Возвращаясь теперь вновь к нашей простейшей задаче о прецессии спина, поинтересуемся ещё только углом поворота его за одно и то же конечное время между двумя событиями в обеих системах отсчёта. Производя интегрирование приведённых выше выражений, получим

$$\varphi_L = \int_0^t \omega_L dt = geBt/2mc\gamma^2 \quad \text{и} \quad \varphi'_L = \int_0^\tau \omega'_L d\tau = geB_0\tau/2mc = geBt/2mc\gamma^2 .$$

Из равенства углов поворота спина следует, что в обоих случаях он относится к одной и той же системе, и, следовательно, ей может быть лишь система покоя частицы.

В отличие от рассмотренного электромагнитного механизма прецессии томасовская прецессия совершенно не зависит от величины магнитного момента и спина частицы и может быть представлена [2] формулой

$$\omega_T = -\frac{\gamma^2}{\gamma+1}\cdot[\vec{\beta}\cdot\dot{\vec{\beta}}] \quad , \qquad (2)$$

где $\dot{\beta}$ -мгновенное ускорение частицы. Видим, что томасовская прецессия возникает лишь в случае, когда ускорение и скорость не совпадают по направлению. Как можно показать, это связано с тем, что томасовский поворот вызывается изменением направления в пространстве продольного лоренцевского сжатия и его величиною. Поэтому аналога этого эффекта в классической механике не существует. Несмотря на большое число работ, посвящённых исследованию этого фундаментального следствия общих преобразований Лоренца без вращений, большинство физиков, не сталкивавшихся с прецессией спина релятивистских частиц, все же не знакомо с этим явлением, хотя роль его не меньше, чем лоренцевского сжатия и замедления хода часов, вытекающих из специальных преобразований Лоренца. По-видимому, популяризаторам теории относительности хватает забот и с одним парадоксом часов, который в рамках теории оказалось невозможным объяснить и приходится прикрываться общей теорией относительности, не имеющей на самом деле никакого отношения к этой задаче.(Действительно, достаточно ввести в действие лишь третьи часы, движущиеся с той же скоростью в обратном направлении и переносящих информацию о прошедшем времени вторых часов и о собственном, как вся проблема сохранения требуемого условия инерциальности элементарно разрешается без какого-либо изменения конечного результата.) В случае томасовского вращения положение, конечно, существенно сложнее и "идея" бегства за рамки теории не помогает. Оказывается, в реальном пространстве при движении по некоторому контуру не существует параллельного переноса вектора, как это имеет место в ньютоновском пространстве. Вернувшись в исходную точку, мы неизбежно обнаружим, что, несмотря на отсутствие сообщающих момент вращения сил, не совпадают не только показания часов, но и все направления, которые были первоначально заданы и сохранялись в исходной точке пространства. Лишь при прямолинейном движении направление лоренцевского сжатия независимо от ускорения не испытывает никакого вращения и поворота координатной системы и связанных с ней векторов не происходит.

Приведенное выше выражение для томасовского члена прецессии можно записать также в виде:

$$\omega_T = -(\gamma - 1)\beta ck = -(\gamma - 1)\omega_c \quad , \qquad (3)$$

где k-кривизна траектории, а ω_c - угловая скорость поворота импульса частицы в данной точке. Этим выражением, показывающим зависимость эффекта от степени лоренцевского сжатия, мы далее и воспользуемся.

Выражение для ω_c в случае движения в скрещенных полях имеет вид

$$\omega_c = \frac{e}{mc}\left(\frac{B}{\gamma} - \frac{\gamma}{\gamma^2 - 1}[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]\right) \quad ,$$

где второй член учитывает замедляющее действие электрического поля. В частности, если $E = -[\vec{\beta}\cdot\vec{B}]$, то кривизна траектории обращается в ноль. Действительно, делая подстановку, получим

$$\omega_c = \frac{eB}{mc}\left(\frac{1}{\gamma} - \frac{\gamma\,\beta^2}{\gamma^2 - 1}\right) = \frac{e\,B}{m\,c}\left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\gamma}\right) = 0 .$$

Выражение для томасовской прецессии (3), таким образом, имеет вид:

$$\omega_T = -\frac{e}{mc}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\cdot B - \frac{\gamma}{\gamma+1}[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]\right) . \qquad (4)$$

Объединяя теперь оба члена прецессии, получим в итоге

$$\omega_s = \frac{g}{2}\cdot\frac{e}{mc}\left(B-[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]\right) - \frac{e}{mc}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}B - \frac{\gamma}{\gamma+1}[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]\right) =$$

$$= \frac{e}{mc}\cdot\left[\left(\frac{g}{2} - \frac{\gamma-1}{\gamma}\right)B - \left(\frac{g}{2} - \frac{\gamma}{\gamma+1}\right)[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]\right] = \qquad (5)$$

$$= \frac{e}{mc}\cdot\left[\left(a + \frac{1}{\gamma}\right)B - \left(a + \frac{1}{\gamma+1}\right)[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]\right] ,$$

где $a=g/2-1$ есть аномальная часть g-фактора частицы. Это и есть известное решение Телегди и др. [6], если его переписать в виде функции трехмерных величин, измеряемых непосредственно в опыте. Полученное выражение описывает мгновенную прецессию спина вдоль трахоидоподобной траектории частицы в масштабе лабораторного времени. В частном случае при $E=0$ для разностной частоты $\omega_s-\omega_c$ имеем

$$\omega_s-\omega_c = \frac{eB}{mc}\cdot a ,$$

то есть для чисто дираковской частицы, для которой $a=0$, $\Delta\omega_{s-c} = 0$. На измерениях именно этой частоты и основана методика известных экспериментов с электронами и мюонами по прецизионному определению их магнитных моментов. Эти измерения с громадной точностью подтверждают независимость измеряемой величины "a" от скорости частиц и тем самым подтверждают справедливость релятивистской теории спиновой прецессии (включая томасовское вращение), кратко изложенной выше.

2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ СПИНА В ДВИЖУЩУЮСЯ СИСТЕМУ ОТСЧЕТА

Это преобразование дает возможность установить, является ли выражение для томасовского члена прецессии, вытекающего из общих преобразований Лоренца без вращений, не составляющих группы, ковариантным относительно группы специальных преобразований Лоренца и решить таким образом вопрос о выполнимости принципа относительности в этом явлении.

Запишем полученное выражение (5) снова в виде двух независимых членов

$$\omega_s = \frac{g}{2}\cdot\frac{e}{mc}\left(B-[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]\right) - \frac{e}{mc}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}B - \frac{\gamma}{\gamma+1}[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]\right)$$

и найдем вид этого уравнения почленно в другой инерциальной системе отсчета и, в частности, такой, в которой электрическое поле "отсутствует". Скорость такой системы β_o определяется, как было показано, модулем отношения E/B, а направление определяется условием $E=-[\vec{\beta}_o\cdot\vec{B}]$, где β_o - скорость электрического дрейфа частицы. Магнитное поле в такой системе B'_o связано с полем B в неподвижной системе соотношением

$$B=B'_o\cdot\gamma_o , \quad где \quad \gamma_o = (1-\beta_o^2)^{-1/2} .$$

Член $[\vec{\beta}\cdot\vec{E}]$, входящий в исходное выражение, в этом случае приводится к виду:

$$[\vec{\beta}\cdot\vec{E}] = -[\vec{\beta}\cdot[\vec{\beta}_o\cdot\vec{B}]] = B(\vec{\beta}_o\cdot\vec{\beta}) ,$$

где $(\vec{\beta}_o\cdot\vec{\beta})$-скалярное произведение векторов.

Скорость частицы $\beta_л$ в движущейся со скоростью β_o системе отсчета связана со скоростью ее β в исходной системе общей формулой сложения скоростей

$$\beta = \frac{(\beta_o^2 + \beta_л^2 + 2\beta_o\beta_л \operatorname{Cos}\theta - \beta_o^2\beta_л^2\operatorname{Sin}^2\theta)^{1/2}}{1+\beta_o\beta_л\cos\theta} , \qquad (6)$$

где θ - угол между векторами $\beta_л$ и β_o в движущейся системе.

Используя выражение (6), получим

$$\gamma = (1-\beta^2)^{-1/2} = \gamma_o\gamma_л[1+(\vec{\beta}_o\cdot\vec{\beta}_л)] ,$$

где γ_o и $\gamma_л$ -лоренц-факторы системы отсчета и частицы соответственно.

Применяя формулу сложения скоростей (6) в обратном порядке для $\beta_л$ в движущейся системе, получим аналогичное соотношение для $\gamma_л$

$$\gamma_л = \gamma_o\gamma\,[1-(\vec{\beta}_o\cdot\vec{\beta})] .$$

(Изменение знака связано с тем, что с точки зрения движущейся системы, неподвижная движется в противоположном направлении со скоростью $-\beta_o$.)

Используя приведенные соотношения путем простой подстановки в (5), получим

$$\omega_s = \frac{geB}{2mc}\left(1-(\vec{\beta}\cdot\vec{\beta}_o)\right) - \frac{eB}{mc}\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} - \frac{\gamma}{\gamma+1}(\vec{\beta}\cdot\vec{\beta}_o)\right) = \frac{geB}{2mc}\cdot\frac{\gamma_л}{\gamma_o\gamma} - \frac{eB}{mc}\cdot\frac{\gamma^2-1-\gamma^2(\vec{\beta}\cdot\vec{\beta}_o)}{\gamma(\gamma+1)} =$$

$$= \frac{g}{2}\cdot\frac{eB}{mc}\cdot\frac{\gamma_л}{\gamma\,\gamma_o} - \frac{eB}{mc}\cdot\frac{(\gamma\gamma_л-\gamma_o)}{\gamma_o\gamma(\gamma+1)} = \frac{g}{2}\cdot\frac{eB'_o}{mc}\frac{\gamma_л}{\gamma} - \frac{eB'_o}{mc}\cdot\frac{(\gamma\gamma_л-\gamma_o)}{\gamma(\gamma+1)} . \qquad (7)$$

В такой форме уравнение (7) описывает прецессию спина по-прежнему в неподвижной системе, выраженную лишь через параметры поля и составляющие скорости движущейся системы отсчёта. Поскольку обе системы инерциальные, то есть не подвержены относительному вращению, то наблюдаемое изменение скорости спиновой прецесси в движущейся системе может быть связано лишь с изменением условий её измерения из-за перехода к другому масштабу времени и другой одновременности, но ни в коем случае не с переименованием компонент поля и выражением эффекта через другие составляющие скорости частицы, выполненным нами уже выше, так как эти параметры, определяющие полностью физические условия решаемой задачи, при этом, конечно, остаются совершенно неизменными. Следует специально подчеркнуть это положение, так как это есть именно тот узловой момент, ясное понимание которого определяет правильность решения. В справедливости такой концепции можно убедиться на множестве примеров из области электродинамики, хотя это должно быть, конечно, ясно и просто из чисто физических соображений.

Таким образом, теперь нам осталось лишь выразить частоту прецессии ω_s в масштабе времени движущейся со скоростью β_o системы отсчета, и требуемое преобразование будет законченным. При этом, если исходное уравнение ковариантно относительно преобразования Лоренца, мы должны получить выражение, не содержащее более параметров γ и γ_o и по форме подобное исходному. Лишь при этих условиях новая движущаяся система может получить право называться неподвижной, а принцип относительности-незыблемым законом природы в данном классе явлений.

Требующееся временное преобразование можно сделать двумя эквивалентными способами: либо непосредственно перейти к масштабу собственного времени движущейся со скоростью β_o системы отсчета, учтя при этом сдвиг ее одновременности по отношению к исходной, либо сделать переход в систему покоя частицы и затем обратный, но уже в систему, в которой скорость частицы не β, а $\beta_л$. Преимущество второго способа в том, что введения поправки на сдвиги одновременностей в этом случае не требуется, так как переходы совершаются между системами, в одной из которых частица всегда покоится. В этом случае из-за эффекта замедления хода движущихся часов частота, измеряемая в системе покоя частицы ω_s^τ, связана с частотами в системах, в которых она движется со скоростями β и $\beta_л$, следующим соотношением:

$$\omega_s \gamma = \omega_s^\tau = \omega_s' \gamma_л \ .$$

Отсюда следует, что $\omega_s' = \omega_s \cdot \dfrac{\gamma}{\gamma_л}$.

Из эквивалентности обоих способов пересчета вытекает, что

$$\omega_s' = \omega_s \gamma_o \alpha = \omega_s \cdot \frac{\gamma}{\gamma_л} \ ,$$

откуда для поправки α на сдвиг одновременности при прямом переходе получим значение [1]

$$\alpha = \frac{\gamma}{\gamma_л \gamma_o} = 1 + (\vec{\beta}_л \cdot \vec{\beta}_o) \ ,$$

которое следует вводить при прямом переходе к масштабу времени системы, движущейся со скоростью β_o. Видим, что величина поправки зависит от направления $\beta_л$ в новой системе отсчета и она отсутствует лишь в случае поперечного по отношению к вектору β_o движения, как и должно быть из-за отсутствия сдвига одновременности в этом направлении.

Физическая суть поправки заключается в учёте неравномерности фактического движения частицы по круговой траектории в движущейся системе по покоящимся в ней часам. Действительно, частица движется регулярно по этой траектории лишь по собственному нерегулярному времени, пролетая одинаковые дуги окружности за равные промежутки собственного времени, как это будет показано ниже (см. с.20). Но эти интервалы не пропорциональны соответствующим интервалам затрачиваемого времени по часам в неподвижной системе, в которой они отнюдь не равны. Но так как ход часов,покоящихся в какой-либо точке движущейся системы, строго пропорционален ходу часов в неподвижной системе в силу их инерциальности, то не могут быть равными и соответствующие промежутки времени, отсчитываемые движущимися часами. Движущийся наблюдатель по своим часам этого не замечает, так как пользуется чисто условной скоростью $\beta_л$, определяемой в рамках собственной одновременности, и поэтому никакого противоречия не возникает.

Таким образом, используя, например, второй способ пересчёта, то есть умножая полученное выражение(7) слева и справа на множитель $\gamma/\gamma_л$, получим в итоге искомый результат

$$\omega_s' = \omega_s \cdot \frac{\gamma}{\gamma_л} = \frac{g}{2} \cdot \frac{eB_o'}{mc} - \frac{eB_o'}{mc} \cdot \frac{(\gamma\gamma_л - \gamma_o)}{\gamma_л(\gamma+1)} = \omega_L' - \omega_c' \cdot \frac{(\gamma\gamma_л - \gamma_o)}{\gamma+1} \ , \qquad (8)$$

полностью совпадающий с полученным ранее в работе [1].

Видим, что первый член, электромагнитный, опять представляет собою ларморовскую прецессию в магнитном поле B_o' при нулевом значении электрического поля, как и должно быть в силу ковариантности выражения для этого члена в исходном уравнении, и в то же время при общей схеме преобразования выражение для томасовского члена прецессии содержит "лишние" параметры γ и γ_o и,следовательно, отличается от того, которое следовало бы написать,исходя лишь из принципа относительности,а именно:

$$\omega_T = -\omega_c'(\gamma_л - 1) \ , \qquad (9)$$

справедливого для неподвижной системы отсчёта.

Полученное выше выражение для томасовского члена прецессии $\omega'_т = -\omega'_c(\gamma\gamma_л - \gamma_o)/(\gamma + 1)$ действительно переходит в выражение (9), но лишь при $\gamma_o = 1$, когда $\gamma = \gamma_л$, то есть когда поступательное движение системы отсчета отсутствует и траектория частицы становится действительно круговой вместо трахоидальной, имеющей место в рассматриваемой задаче. Таким образом, нековариантная добавка к члену томасовской прецессии $\omega_т$, имеющей место в неподвижной системе, связанная с поступательным движением системы отсчёта со скоростью β_o, есть

$$\Delta\omega'_т = \omega'_т - \omega_т = -\omega'_c\left(\frac{\gamma\gamma_л - \gamma_o}{\gamma+1} - \gamma_л + 1\right) = \omega'_c\left(\frac{\gamma_л + \gamma_o}{\gamma+1} - 1\right),$$

и, следовательно, скорость спиновой прецессии в движущейся системе отсчёта можно записать просто в виде

$$\omega'_s = \omega_s + \Delta\omega'_т , \qquad (10)$$

где ω_s -скорость спиновой прецессии в неподвижной системе при E=0, то есть когда мировая траектория частицы в действительности круговая.

Заметим, что добавочная величина $\Delta\omega'_т$ может быть вычислена, конечно, и непосредственно из величины угла добавочного томасовского поворота ε, возникающего при сложении векторов β_o и $\beta_л$, определяемого, согласно работе [8], выражением

$$\operatorname{Sin}(\theta+\varepsilon) = \frac{\gamma_o + \gamma_л}{\gamma+1} \operatorname{Sin}\theta , \qquad (11)$$

где θ -угол между складываемыми векторами β_o и $\beta_л$ в движущейся системе. Значение $d\omega'_т = d\varepsilon/d\tau$, полученное недавно в работе [9] просто дифференцированием выражения (11), естественно, строго совпадает, включая и знак, с величиной $\Delta\omega'$, полученной выше в результате прямого лоренцевского преобразования и служит лишь ещё одним подтверждением корректности выполненных в обоих случаях расчётов.*)

Следует заметить, что полученное нами выражение (8), как и исходное (5), описывает мгновенную, то есть локальную, спиновую прецессию. Если произвести усреднение полученного выражения по углу наблюдения θ в пределах от 0 до π, входящему в выражение для γ, то ковариантность и справедливость принципа относительности в рассматриваемой задаче вос-

*) *Однако утверждение автора работы [9], что противоречие с принципом относительности благодаря этому совпадению якобы устраняется, представляется более чем странным. Предполагаемый им способ "компенсации", осуществляемый на деле произвольным вычитанием из величины ω'_s нековариантной добавки $\Delta\omega'_т$ к члену томасовской прецессии (9), содержащейся в выражении (10) и возникающей именно в силу движения системы отсчёта со скоростью β_o, конечно, по определению приводит к величине прецессии спина в неподвижной системе при E=0. Но это не имеет все же никакого отношения к решаемой задаче, так как эквивалентно просто изменению её физических условий и, следовательно, является простым самообманом.*

станавливается. Действительно, объединяя оба члена прецессии в (8) и вводя величину $a = \frac{g}{2} - 1$, получим

$$\omega'_s = \frac{eB'_o}{mc}\left(a + \frac{1}{\gamma_л}\cdot\frac{\gamma_o + \gamma_л}{\gamma + 1}\right) = \frac{eB'_o}{mc}\left(a + \frac{1}{\gamma_л}\cdot\frac{\gamma_o + \gamma_л}{\gamma_o\gamma_л(1 + \beta_o\beta_л \operatorname{Cos}\theta) + 1}\right).$$

Для нахождения среднего значения ω' в интервале от 0 до π нужно вычислить интеграл

$$\overline{\omega'_s} = \frac{1}{\pi}\int_0^\pi \omega'_s\, d\theta = \frac{eB'_o}{mc} a + \frac{eB'_o(\gamma_o + \gamma_л)}{\pi mc\gamma_л}\int_0^\pi \frac{d\theta}{1 + \gamma_л\gamma_o(1 + \beta_л\beta_o\cos\theta)} .$$

Так как

$$\int \frac{dx}{b + c\cdot\cos x} = \frac{2}{\sqrt{b^2 - c^2}} \operatorname{Arctg}\left[\sqrt{\frac{b-c}{b+c}}\ \operatorname{tg} x/2\right] \quad \text{при} \quad b^2 > c^2,$$

то искомый интеграл в пределах от 0 до π равен

$$\frac{\pi}{\sqrt{b^2 - c^2}} = \frac{\pi}{\sqrt{(1 + \gamma_л\gamma_o)^2 - \gamma_л^2\gamma_o^2\beta_o^2\beta_л^2}} = \frac{\pi}{\gamma_o + \gamma_л} ,$$

и, следовательно, средняя частота прецессии в движущейся системе отсчета есть

$$\overline{\omega'_s} = \frac{eB'_o}{mc}\cdot\left(a + \frac{1}{\gamma_л}\right) = \frac{g}{2}\cdot\frac{eB'_o}{mc} - \omega_c(\gamma_л - 1),$$

то есть действительно не зависит от параметров γ и γ_o, и выражение совпадает по форме с исходным (5), если положить в нем E=0. Это, конечно, весьма существенно, так как в противном случае полученный результат вступал бы в противоречие с прецизионными измерениями аномальной части магнитных моментов электронов и мюонов, основанными на наблюдениях именно средних скоростей прецессии в движущейся системе отсчета, которую и представляет Земля.

Вторая независимая проверка правильности полученного выражения может быть выполнена и прямым численным расчетом на базе исходного уравнения (5), например, таких двух точек, расположенных на траектории частицы, в промежутке между которыми её спин испытывает поворот ровно на 180°. Очевидно, что при правильном описании спин частицы должен испытывать аналогичный поворот и в любой другой инерциальной системе отсчета в промежутке между теми же событиями, то есть соответствующими точками на траекториях в этих системах, поскольку противоположность двух направлений в пространстве в этом случае не зависит от систем отсчета, если они, конечно, инерциальные. Более того, поскольку вычисленный на основе уравнений (5) и (8) угол поворота спина в обоих случаях относится к системе покоя частицы, как бы не испытывающей уже томасовского поворота, учтённого уравнениями, то соответствующие интегралы должны быть вообще тождественными, если пределы интегрирования соответствуют одним и тем же событиям, например, точкам пересечения частицей определённой ординаты, общей для обеих систем. Это соответствует представлению, что в одной и той же точке пространства в один и тот же момент времени спин частицы в собственной системе не может занимать два положения. Полученное решение, безусловно, полностью удовлетворяет и этому непреложному требованию (см. приложение).

Для наглядности интересно также сравнить скорости ларморовской и томасовской прецессий со скоростью хода движущихся по той же траектории часов, движение стрелки которых $d\varphi/dt$ при соответствующей скорости вращения может быть уподоблено и вращению спина. Интервалы собственного времени, пропорциональные углу поворота стрелки часов, отсчитываемые за равные дуговые интервалы на круговой траектории, в соответствии с принципом относительности, очевидно, должны быть одинаковы и в том случае, когда вся система совершает поступательное движение в пространстве. Действительно, например, для двух равных дуговых интервалов ΔL на противоположных участках круговой траектории, где скорость движения часов $\beta_л$ параллельна и антипараллельна скорости системы β_o, можно написать следующие соотношения для времен пролета часами дуги dL:

$$\Delta t_1 = \Delta\tau_1\gamma_1 = \Delta L/\beta_{1(отн)} \quad \text{и} \quad \Delta t_2 = \Delta\tau_2\gamma_2 = \Delta L/\beta_{2(отн)}, \qquad (12)$$

где γ_1 и γ_2 –лоренц-факторы в экстремальных точках трахоидальной траектории, $\beta_{1(отн)}$ и $\beta_{2(отн)}$ –относительные скорости движения вдоль движущейся дуги ΔL и $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_2$–соответствующие интервалы затрачиваемого собственного времени часов. Так как значения относительных скоростей есть

$$\beta_{1(отн)} = \beta_1 - \beta_o = \frac{\beta_o + \beta_л}{1+\beta_o\beta_л} - \beta_o = \frac{\beta_л(1-\beta_o^2)}{1+\beta_o\beta_л},$$

$$\beta_{2(отн)} = \beta_o - \beta_2 = \beta_o - \frac{\beta_o - \beta_л}{1-\beta_o\beta_л} = \frac{\beta_л(1-\beta_o^2)}{1-\beta_o\beta_л},$$

а значения лоренц-факторов

$$\gamma_1 = \gamma_o\gamma_л(1+\beta_o\beta_л) \quad \text{и} \quad \gamma_2 = \gamma_o\gamma_л(1-\beta_o\beta_л),$$

то, подставляя их в (12) и производя деление и сокращения, получим

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} = \frac{\Delta\tau_1(1+\beta_o\beta_л)}{\Delta\tau_2(1-\beta_o\beta_л)} = \frac{1+\beta_o\beta_л}{1-\beta_o\beta_л},$$

откуда следует, что $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2$ и, следовательно, с точки зрения движущегося наблюдателя часы, движущиеся по круговой траектории со скоростью

$\beta_л$, идут вполне регулярно. Однако угловая скорость вращения стрелки часов как функция их мгновенной скорости вдоль трахоидальной траектории в неподвижной системе есть

$$\omega_\varphi = \frac{d\varphi}{dt} = \omega_o\cdot\frac{d\tau}{dt} = \omega_o\cdot\frac{1}{\gamma} = \frac{\omega_o}{\gamma_л}\cdot\frac{\gamma_л}{\gamma} = \omega_r\cdot\frac{\gamma_л}{\gamma},$$

где ω_o – скорость хода неподвижных часов, а ω_r – скорость хода их на круговой орбите. Такая же зависимость от скоростей имеет место и для ларморовского члена спиновой прецессии (см. (7)), который можно записать в аналогичном виде

$$\omega_L = \frac{g}{2}\cdot\frac{eB'_o}{mc}\cdot\frac{\gamma_л}{\gamma} = \omega_L^o\cdot\frac{\gamma_л}{\gamma},$$

где ω_L^o – ларморовская частота прецессии спина частицы на круговой орбите. Видим, что как стрелка часов, так и спин частицы хотя и вращаются со скоростью, обратно пропорциональной лоренц-фактору γ, являющемуся функцией азимутального угла $\theta'=\theta$, углы поворота их при пролёте одинаковых дуговых интервалов вдоль круговой траектории оказываются равными за счёт точно такого же изменения и их относительной скорости при соответствующих азимутах, как это было показано выше, полностью удовлетворяя требованию принципа относительности.

Оказывается, противоположная ситуация имеет место для томасовского члена прецессии спина, связанная с совершенно другой зависимостью его от угла θ, в результате чего учёт изменения относительной скорости приводит не к выравниванию углов поворота спина в движущейся системе, а лишь к ещё большему их различию. Действительно, найденное выше выражение для этого члена в неподвижной системе (см. (7)) можно записать в аналогичном виде, как

$$\omega_T = -\frac{eB'_o}{mc}\cdot\frac{\gamma\gamma_л-\gamma_o}{\gamma(\gamma+1)} = \omega_T^o\cdot\frac{\gamma\gamma_л-\gamma_o}{(\gamma+1)(\gamma_л-1)}\cdot\frac{\gamma_л}{\gamma},$$

где $\omega_T^o = -eB'_o(\gamma_л-1)/mc\gamma_л$ есть томасовская прецессия на круговой орбите, требуемая принципом относительности. Учёт влияния изменения относительной скорости, как и в предыдущих случаях, сводится к компенсации лишь множителя $\gamma_л/\gamma$, который, как показывает расчёт, не увеличивает, а наоборот, даже уменьшает величину азимутальной асимметрии этого члена прецессии из-за совпадения положения минимума остающегося среднего члена произведения с положением минимума функции γ. Возникающая угловая зависимость томасовской прецессии в движущейся системе, даваемая уравнением (8), связанная с оставшимся средним множителем, для наглядности приведена на рис.1 для ряда значений $\gamma_л$ и γ_o. Пунктирными линиями показаны усреднённые по углу θ значения, удовлетворяющие принципу

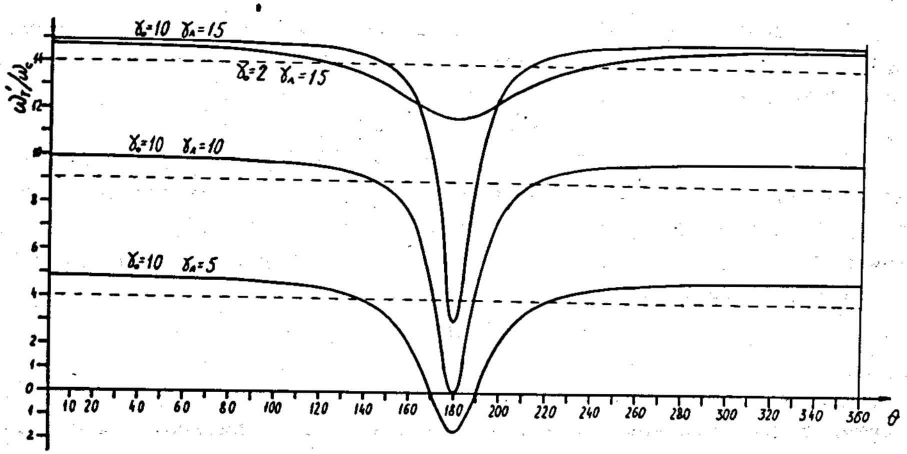

Рис. 1

относительности. Отрицательные значения относительной скорости прецессии при $\gamma_o > \gamma_л$ соответствуют изменению направления томасовского вращения при соответствующих азимутах.

На основании полученного решения (8) суммарная локальная скорость спиновой прецессии в движущейся лаборатории должна иметь два экстремума $\omega'_{s(min)}$ и $\omega'_{s(max)}$ при углах наблюдения $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ соответственно.

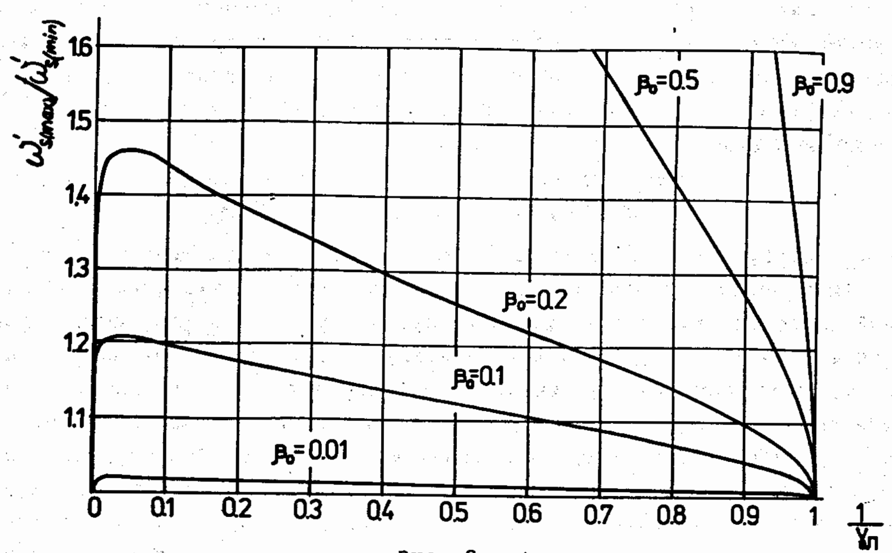

Рис. 2

Зависимость отношения этих величин для электронов от их лоренц-фактора $\gamma_л$ приведена для наглядности на рис.2 для ряда значений скорости лаборатории β_o и демонстрирует величину нарушения принципа относительности при соответствующих параметрах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, движущаяся система отсчета во всем эквивалентна неподвижной при наблюдении физических процессов в ней, кроме томасовского вращения координатных осей либо любых векторов, связанных с объектами, движущимися по криволинейным траекториям в этой системе. Это вращение, связанное с лоренцевской деформацией, отражает действительную кривизну и скорость данных объектов, а не те значения этих параметров, которые может приписать им движущийся наблюдатель, исходя из собственных измерений. Это именно то, что не мог знать Ньютон и чего ему так не хватало для доказательства абсолютности пространства и движения, в связи с чем он мог возлагать свои надежды лишь на будущее, ясно понимая необходимость обоснования закона инерции как проявления физических свойств этого пространства, и чего так не хватало всем естественно мыслящим для построения объективной картины мира без каких-либо условностей.

Томасовское вращение, как следует из проведённого анализа, разрушает МИФ о полном равноправии всех инерциальных систем отсчета, возникший на заре нашего века из-за отрицательного результата опыта Майкельсона-Морли и других, и вновь вынуждает поставить в повестку дня этот фундаментальный вопрос, но только на более высоком уровне знания, включающем признание действительности лоренцевских преобразований и всех следствий, вытекающих из них, в том числе и томасовского вращения как реальной действительности нашего мира. Однако теперь можно надеяться, что в новой постановке эксперимента Природе не удастся всё же уйти от прямого ответа на задаваемый ей в другой форме прежний вопрос.

Автор выражает глубокую благодарность за обсуждение данной проблемы и критические замечания Я.А.Смородинскому, Н.А.Черникову, Г.Н.Афанасьеву, В.С.Барашенкову, В.Л.Любошицу и особенно А.А.Тяпкину, которому автор обязан за первоначальное формирование своей позиции по отношению к лоренцевской концепции и принципу относительности.

П Р И Л О Ж Е Н И Е

Для нахождения путём интегрирования уравнения (5) угла поворота спина частицы между заданными точками на её траектории в неподвижной системе нужно бы прежде всего строго решить чисто механическую задачу о движении частицы в заданном поле и найти скорость частицы и её направления как функцию времени в этой системе.

Ускорение частицы в электромагнитном поле описывается, как известно, следующим уравнением:

$$\dot{\beta} = \frac{e}{mc\gamma}\,(\mathbf{E} + [\vec{\beta}\cdot\vec{\mathbf{B}}] - \beta(\vec{\beta}\cdot\vec{\mathbf{E}}))\ .$$

Делая подстановку $\mathbf{E} = -[\vec{\beta}_o\cdot\vec{\mathbf{B}}]$, соответствующую условиям решаемой нами задачи, получим:

$$\dot{\beta} = \frac{e}{mc\gamma}\,(-[\vec{\beta}_o\cdot\vec{\mathbf{B}}]+[\vec{\beta}\cdot\vec{\mathbf{B}}]-\beta(\vec{\beta}[\vec{\beta}_o\cdot\vec{\mathbf{B}}]))\ .$$

Введём теперь декартову систему координат x y z так, чтобы магнитное поле **B** было направлено по оси z, электрическое **E** по оси y, и начальную скорость частицы зададим в плоскости xy. В этом случае траектория частицы будет испытывать электрический дрейф в направлении оси x со скоростью $\beta_o = |\mathbf{E}/\mathbf{B}|$, оставаясь всё время в этой плоскости. В этом случае для составляющих ускорения получим систему из двух уравнений:

$$\dot{\beta}_x = \frac{e}{mc\gamma}\,(\beta_y - \beta_x\beta_y\beta_o)$$
$$\dot{\beta}_y = \frac{e}{mc\gamma}\,(\beta_o - \beta_x - \beta_y^2\beta_o) \qquad (13)\ ,$$

совместное решение которых даёт точный ответ на поставленный вопрос. Однако ввиду нелинейности этих уравнений простого решения их в элементарных функциях не существует, и оно не приводится в известных курсах по электродинамике. Чтобы избежать излишних сложностей, в данной ситуации проще всего воспользоваться принципом относительности, который в этой задаче ещё заведомо строго выполняется. Введём для этого движущуюся в направлении оси x со скоростью β_o систему координат x' y' z' с той же ориентацией осей, что и у системы x y z. В этой системе в соответствии с преобразованиями Лоренца электрическое поле отсутствует, и, следовательно, частица должна двигаться по круговой траектории с постоянной скоростью $\beta_л$ по собственной одновременности и времени этой системы. Следовательно, в неподвижной системе xyz частица в соответствии с теми же преобразованиями должна описывать эллипс с полуосями $в/а = \gamma_o$ на движущейся со скоростью β_o плоскости. Если бы частица могла оставлять след на этой плоскости, то после её остановки на ней оказалась бы окружность с радиусом, равным большой полуоси эллипса "в" из-за

обратного эффекта продольного растяжения плоскости при её торможении. Эту окружность и видит движущийся совместно с плоскостью наблюдатель, согласно собственным измерениям. Относительная скорость частицы вдоль движущегося эллипса направлена в каждой точке по касательной к нему и составляет с осями y и y' угол φ, связанный с углом φ' между осью y' и скоростью $\beta_л$ при той же ординате простым соотношением $tg\varphi' = \gamma_o tg\varphi$. Проекции скорости частицы β в неподвижной системе β_x и β_y, входящие в систему уравнений (13), связаны с проекциями относительной скорости вдоль эллиптической траектории β'_x и β'_y в соответствии с векторным исчислением равенствами $\beta'_y = \beta_y$ и $\beta'_x = \beta_x - \beta_o$. При этом $tg\varphi = (\beta_x - \beta_o)/\beta_y$. Так как $\beta_x^2 + \beta_y^2 = \beta^2$, то, делая подстановку $\beta_x = \beta_y tg\varphi + \beta_o$, получим выражение

$$\beta_x = \frac{\beta_o}{1 + tg^2\varphi} \pm \left(\frac{\beta_o^2}{(1 + tg^2\varphi)^2} - \frac{\beta_o^2 - \beta^2 tg^2\varphi}{1 + tg^2\varphi}\right)^{1/2}\ ,$$

в котором знак перед корнем должен выбираться − , пока значение корня больше первого члена, и знак + при меньших значениях. При значениях β и φ, приводящих к равенству членов, $\beta_x = 0$ и частица движется в направлении оси y. Скорость β как функция значения координаты y, а следовательно, и связанного с ней угла φ, может быть выражена просто через потенциал поля в данной точке с учетом кинетической энергии частицы в точке, потенциал в которой условно принят за нулевой. Это связано с тем, что магнитное поле не способно производить работу, и изменение энергии частицы определяется при любом движении лишь разностью потенциалов между соответствующими точками на её траектории. Если выбрать нулевой потенциал в одной из точек, соответствующих максимальному отклонению частицы в направлении оси y, в которых β_y обращается в ноль, то для лоренц-фактора частицы γ в произвольной точке траектории имеет место равенство

$$\gamma = (\varepsilon_o \mp yE + mc^2)/mc^2\ ,$$

где ε_o – кинетическая энергия частицы в точке с нулевым потенциалом. Значение γ и, соответственно, ε_o в этой точке определяется выражением

$$\gamma = (\varepsilon_o + mc^2)/mc^2 = 1/\sqrt{1-\beta_x^2}\ , \text{ где } \beta_x = (\beta_л \pm \beta_o)/(1 \pm \beta_л\beta_o).$$

Таким способом могут быть найдены значения скорости и её направления в неподвижной системе как функции координаты y, и может быть найдена и траектория частицы в этой системе. Разумеется, эти же результаты можно получить и без использования потенциалов поля, применяя общую формулу сложения скоростей (6) и дополняющую её формулу

$$\cos\theta' = \frac{\beta_л \cos\theta + \beta_o}{(\beta_л^2 + \beta_o^2 + 2\beta_л\beta_o\cos\theta - \beta_л^2\beta_o^2\sin^2\theta)^{1/2}} \quad ,$$

где θ -угол между β_o и $\beta_л$, а θ'-угол между β_o и β, частным случаем первой из которых мы и воспользовались для определения величины ε_o.

Однако можно избежать всех сложностей, возникающих при любом прямом методе нахождения скоростей и их направлений и последующем численном интегрировании, весьма простым приёмом,приводящим к тем же результатам, заключающимся просто в замене переменной интегрирования t на угол θ, основанным на факте пропорциональности его интервалу собственного времени частицы, как это было показано на с.20. Следовательно, эту замену можно произвести согласно условию

$$dt = \gamma\, d\tau' = \gamma\, d\theta/\omega_c' \quad ,$$

где $\omega_c' = eB_o'/mc$ -угловая скорость вращения частицы в поле B_o', выраженная в собственном времени частицы τ'.

Займёмся теперь непосредственно интегрированием уравнения (5), переписав его для интересующего нас случая, когда $E = -[\vec\beta_o \cdot \vec B]$, в виде

$$\omega_s = \frac{e}{mc}\left[\left(a + \frac{1}{\gamma}\right)B - \left(a + \frac{1}{\gamma+1}\right)[\vec\beta\cdot\vec E]\right] = \frac{eB}{mc}\left(a + \frac{1}{\gamma} - a(\vec\beta\cdot\vec\beta_o) - \frac{1}{\gamma+1}(\vec\beta\cdot\vec\beta_o)\right) =$$

$$= \frac{eB}{mc}\left(a[1-(\vec\beta\cdot\vec\beta_o)] + \frac{\gamma(1-(\vec\beta\cdot\vec\beta_o)+1}{\gamma(\gamma+1)}\right) = \frac{eB}{mc}\frac{\gamma_л}{\gamma_o\gamma}\cdot a + \frac{eB}{mc}\frac{\gamma_o+\gamma_л}{\gamma_o\gamma(\gamma+1)} .$$

Для угла поворота спина, выраженного через величину угла θ, получим следующее значение:

$$\varphi_s = \int_0^t \omega_s dt = \frac{mc}{eB_o'}\cdot\int_0^\theta \omega_s\gamma d\theta = \gamma_л a\, \theta + (\gamma_o+\gamma_л)\int_0^\theta \frac{d\theta}{1+\gamma_o\gamma_л(1+\beta_o\beta_л\cos\theta)} =$$

$$= \gamma_л a\, \theta + 2\mathrm{Arctg}\left(\sqrt{\frac{1+\gamma_o\gamma_л(1-\beta_o\beta_л)}{1+\gamma_o\gamma_л(1+\beta_o\beta_л)}}\cdot \mathrm{tg}\frac{\theta}{2}\right) . \qquad (14)$$

Произведём теперь интегрирование выражения (8), полученного для скорости спиновой прецессии в движущейся системе, которое можно переписать, объединяя оба члена, в виде

$$\omega_s' = \frac{eB_o'}{mc}\left(a + \frac{1}{\gamma_л}\cdot\frac{\gamma_o+\gamma_л}{1+\gamma}\right) .$$

Делая замену переменной интегрирования в соответствии с равенством

$$d\tau = \frac{d\theta}{\omega_c} = \frac{mc\gamma_л}{eB_o'}\cdot d\theta$$

и производя интегрирование, получим точно такой же результат

$$\varphi_s' = \int_0^\tau \omega_s'\, d\tau = \gamma_л a\theta + (\gamma_o+\gamma_л)\int_0^\theta \frac{d\theta}{1+\gamma_o\gamma_л(1+\beta_o\beta_л\cos\theta)} = \varphi_s ,$$

что и требовалось показать.

Рассчитанные по формуле (14) зависимости угла поворота направления спина релятивистской дираковской частицы (a=0, $\gamma_л$=10) от величины пройденной ею дуги, определяемой азимутальным углом между радиус-вектором и ординатой y, равным углу θ, приведены для иллюстрации на рис.3 для ряда значений поступательной скорости системы отсчета β_o,указанной на графиках, определяющей величину асимметрии вращения спина вдоль траектории частицы. Аналогичный поворот спин испытывает и на второй половине дуги при изменении угла θ от π до 2π (не показанный на рис.3).

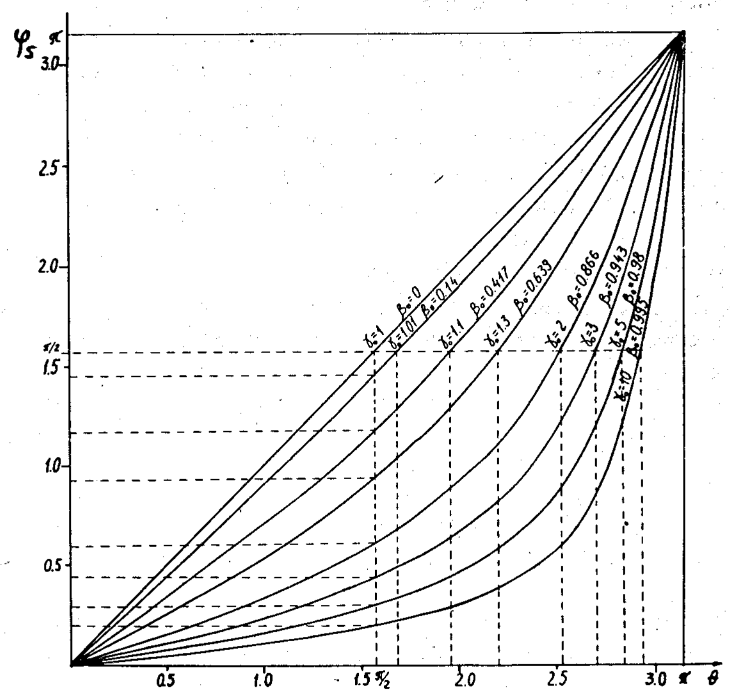

Рис. 3

Вертикальными пунктирными линиями отмечены значения θ, соответствующие повороту спина на 90°, иллюстрирующие возрастание степени асимметрии вращения спина по мере возрастания поступательной скорости лаборатории в пространстве. С учётом второй половины пути видим,что, например, при

β_o=0.994, когда $\gamma_o = \dot{\gamma}_л$, спин частицы меняет своё направление на обратное при пролёте частицей дуги величиною всего лишь ≈0.4 радиана и возвращается в исходное положение на остальном участке дуги величиною ≈ 5.88 радиана. Эта неравномерность вращения спина обусловлена только неравномерностью томасовского вращения, замедляющего вращение спина, обращающегося в данном случае в точке $\theta=\pi$ в нуль из-за нулевой скорости частицы в неподвижной системе при этом азимуте.

ЛИТЕРАТУРА

1). Б.С.Неганов. Препринты ОИЯИ Р4-89-827, Е4-89-827, Дубна, 1989. B.S.Neganov. Hadronic Journal, 1991, V.14, pp.377-394.
2). К. Мёллер. Теория относительности, М.: Атомиздат, 1975.
3). Дж. Филд, Э. Пикасо, Ф. Комбли. УФН, 1979, т. 127, вып. 4.
4). Б.С.Неганов. Препринт ОИЯИ Д1-91-96, Дубна, 1991.
5). H.Poincare, Rev. Methaphys. Morales 6, 1 (1898).
6). V.Bargmann, L.Michel and V.L.Telegdí. Phys Rev. lett.,1959, 2,p.435. В.Б.Берестецкий, Е.М.Лившиц, Л.П.Питаевский. Квантовая электродинамика, М.: Наука , 1980, Т. 4.
7). А.А.Тяпкин. УФН, 1972, т.106, в.4, с.650.
8). A.A.Ungar. Foundations of Physics Letters, 1988, v.1, p. 57.
9). В.С.Барашенков. Сообщение ОИЯИ Р2-92-349, Дубна, 1992.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 ноября 1992 года.

Неганов Б.С. Д2-92-446

О нарушении принципа относительности при локальных измерениях спиновой прецессии движущихся частиц

Произведен повторный анализ явления спиновой прецессии релятивистских заряженных частиц и показана неизбежность нарушения принципа относительности при локальных измерениях спиновой прецессии при движении по криволинейной траектории, что обусловлено вкладом томасовского вращения. Приведен наиболее простой вывод уравнений движения спина в неподвижной и движущейся системах отсчета и показана возможность определения абсолютной скорости Земли по величине азимутальной асимметрии спиновой прецессии. Попутно развивается лоренцевская эфирная концепция как более общая теория, устанавливающая границы применимости существующего феноменологического метода условного изотропного описания явлений в движущихся системах отсчета в рамках специальной теории относительности.

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод С.В.Чубаковой

Neganov B.S. D2-92-446

On Relativity Principle Violation in Local Measurements of Spin Precession of Moving Particles

The repeated analysis of spin precession phenomenon of relativistic charged particles was performed. The inevitability of the relativity principle violation in local measurements of spin precession was shown while particle moving along a curvilinear trajectory due to the Thomas precession. The simplest deduction of spin equations of motion has been received in the fixed and reference frames. The possibility to determine the Earth's absolute velocity by means of measuring the azimuthal asymmetry of spin precession was shown. Besides, Lorentz's etheric conception is being developed as a more fundamental theory, which establishes the limits of existing phenomenological method of the conventional isotropic description of the phenomena in moving reference frames within the limits of the special relativity theory.

The investigation has been performed at the Particle Physics Laboratory, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992