

ГРАВИТАЦИЯ И ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

ВЫПУСК 26



ИЗДАТЕЛЬСТВО
КАЗАНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1986

К ВОПРОСУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ НЕКОТОРЫХ
ПОЛОЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ ДВИЖУЩИХСЯ СРЕД

Вопросы электродинамики в движущихся системах координат, которые постоянно волновали исследователей в связи с проблемой эфира на протяжении более 150 лет, в настоящее время вновь становятся предметом более активного изучения. В первую очередь, это связано с успехами в области исследования свойств физического вакуума, который уже стало невозможным считать просто пустотой. С другой стороны, появились новые перспективные возможности для постановки экспериментов в этой области, основанные на высоком уровне современного развития космической и лазерной техники, квантовой электроники, оптики и других разделов физики.

Исторически опыты с распространением электромагнитного излучения (особенно в области оптического диапазона) наиболее часто служили ключевыми экспериментами для установления природы света и вещества. При этом их постановка была тесно связана с необходимостью введения понятия некой материальной среды с упругими свойствами (эфира, вакуума как электронно-позитронного континуума и т.п.). Поскольку в прошлом веке эфир рассматривался как среда, необходимая для переноса излучения ("светоносный" эфир) путем ее механических возмущений, то практически два разных вопроса смешивались в один. А именно: существует ли эфир, как праматерия, из которой построен весь мир, и возможно ли обнаружить движение относительно эфира? Такое слияние этих вопросов исторически привело к образованию, казалось бы, неразрешимого клубка противоречий, в основе которого, с одной стороны, лежало отсутствие достаточных данных о свойствах эфира, а с другой — наличие множества экспериментальных результатов по изучению природы электромагнитных полей (эффекты распространения, дифракция, интерференция, квантованность полей и т.д.). Безуспешные попытки экспериментально обнаружить движение относительно эфира (Араго, 1818 г.; Майкельсон, 1881, 1887 гг.) привели в конечном итоге Эйнштейна к необходимости вообще отбросить понятие эфира, т.е. отрицательный ответ на вто-

рой вопрос неизбежно определил судьбу первого. В 1910 г. Эйнштейн писал, "что нельзя создать удовлетворительную теорию, не отказавшись от существования некой среды, заполняющей все пространство" [1]. Однако в дальнейшем (1920 г.) при построении общей теории относительности Эйнштейн вынужден был вернуться к эфиру как мировой среде. Например, "мы не можем в теоретической физике обойтись без эфира, т.е. континуума, с наделенными физическими свойствами" [2].

В настоящее время эта точка зрения уже не вызывает сомнения у большинства физиков. Считается, что имеется некая упругая среда — физическое поле, сингулярности которого являются своеобразными дефектами и образуют спектр частиц, из которых в свою очередь построены все материальные образования (см. например, [3]). Подтверждением этого является экспериментальное обнаружение ряда вакуумных эффектов: нулевые флуктуации, поляризация вакуума, рождение частиц при взаимодействии электромагнитных полей в вакууме.

Таким образом, существование эфира можно считать доказанным. Вопрос же, можно ли экспериментально при помощи электромагнитных волн (света) обнаружить движение источника этих волн относительно эфира, требует детального рассмотрения. Это рассмотрение связано с концепцией эфирного ветра.

Исторически признание волновой природы света требовало понимать его распространение как волновой механический процесс возмущений эфира по принципу близкодействия. Поэтому, естественно, при рассмотрении механизма переноса такого возмущения по среде (эфиру) большое значение приобрел вопрос об увлечении эфира движущимися телами. Отсюда как следствие возникла концепция неподвижного абсолютно неувлекаемого эфира, которая была детально развита в работах Лоренца [4]. При таком подходе скорость эфирного ветра по величине совпадает со скоростью движения тела (источника света), но противоположна по направлению. Это обстоятельство и породило надежды экспериментаторов обнаружить абсолютное движение по изменению скорости света. Наиболее известным из опытов по обнаружению эфирного ветра является ставший уже классическим опыт Майкельсона, который основан на интерференции световых волн [5].

Впервые поставленный в 1881 г., этот опыт дал отрицательный результат. Поскольку этот результат не удовлетворил ни Майкельсона, ни многих других физиков, он периодически повторялся в течение почти 100 лет при постоянном усовершенствовании техники измерений. Надо отметить, что, если первые приборы (Майкельсон, 1881 г.; Майкельсон и Морли, 1887 г.) обладали низкой чувствительностью (практически ожидаемый

результат находился на уровне ошибок измерения), то позднее его чувствительность была значительно увеличена. Тем не менее в большинстве случаев имел место все тот же отрицательный результат. Однако вывод об отсутствии эфирного ветра трудно было согласовать с данными некоторых опытов. В частности, в 1921-1925 гг. опыт, выполненный Миллером [6], дал, по мнению его автора, положительный результат. Несмотря на то, что полученное в этом опыте значение скорости ветра (примерно 10 км/с) вызывает некоторое недоверие, нельзя закрывать глаза на сам факт обнаружения смещения интерференционных полос, обусловленного изменением положения прибора в пространстве. Тщательное исследование влияния различных факторов на это смещение (тепловых, конвекционных, магнитострикционных, излучательных, вибраций, деформаций конструкций и т.д.) привело Миллера к однозначному выводу о наличии эфирного ветра.

В течение 1925 г. опыт был повторен как на уровне моря, так и на высоте 1860 м (в обсерватории Маунт-Вилсон). Основной особенностью являлось то, что смещение полос было зарегистрировано лишь в том случае, когда измерение проводилось на высоте (1860 м г. Маунт-Вилсон). На уровне моря эффект отсутствовал. Это, с одной стороны, подтверждало гипотезу Стокса о возможности увлечения эфира летящей в пространстве Земли, а с другой стороны, могло служить объяснением отсутствия положительного результата во многих экспериментах, выполненных, как правило, на уровне моря.

В дальнейшем этот опыт был повторен другими авторами, и в одних экспериментах опыт Миллера был подтвержден (Майкельсон и др., 1929г.), а в других опровергнут (Кеннеди, Пикар, Стаэль, Эссен, Таунс, Гедархольм (см. табл. I)).

Т а б л и ц а I

Годы	Авторы	Высота над уровнем моря (км)	Скорость эфирного ветра (км/с)
1818	Араго (ход лучей в призме, линзах)	0	-
1838	Бабине (интерф. в тонких пласт.)	0	-
1859	Физо (вращ. пл. поляризации)	0	-
1865	Ангстрем (диффр.)	0	-

Годы	Авторы	Высота над уровнем моря (км)	Скорость эфирного ветра (км/с)
1881	Майкельсон (интерф.)	0	< 18
1887	Майкельсон, Морли	0	< 7,5
1904	Морли, Миллер	0	< 3,5
1905	Миллер, Морли	0,1	~ 3
1921-1925	Миллер	1,86	~ 10
1926	Кеннеди	1,86	< 1
1926	Пикар, Стаэль	2,5	< 7
1927	Иллингворт	0	< 1
1926-1929	Майкельсон, Пис, Лирсон	1,86	~ 6
1930	Иосс	?	< 1,5
1955	Эссен (резонатор)	?	< 0,24
1959	Таунс, Гедархольм (мазеры на самолетах)	?	< 0,03

Примечания: знак < говорит о том, что аппаратура способна обнаружить "ветер", если величина скорости его превосходит указанное значение (эффект смещения полос, обусловленный "ветром" в этих экспериментах не наблюдался); знак ~ означает, что наблюдался сдвиг полос, превышающий пороговую чувствительность, а величина скорости "ветра" имеет указанное значение.

Опыты, результаты которых исторически послужили окончательным приговором концепции эфирного ветра, проводились, как правило, на больших высотах и имели высокую удельную чувствительность. Стремление повысить удельную чувствительность в этих опытах за счет улучшения точности регистрации полос было вызвано необходимостью уменьшения габаритов, чтобы можно было поднять прибор как можно выше над уровнем моря. Увеличение точности регистрации полос при этом достигалось в основном за счет экранировки лучей в интерферометре от внешних воздействий, т.е. термостатированием. При этом вопрос о возможности экранировки самого эфирного ветра вместе с экранировкой лучей вообще никем не обсуждался при постановке этих опытов. Если не исключать такую возможность, то эфир, заключенный внутри термостата (Пикар, Стаэль), резонатора (Эссен), мазеров (Таунс, Гедархольм), может увлекаться вместе с прибором. Если при этом прибор даже обдувается эфирным ветром снаружи,

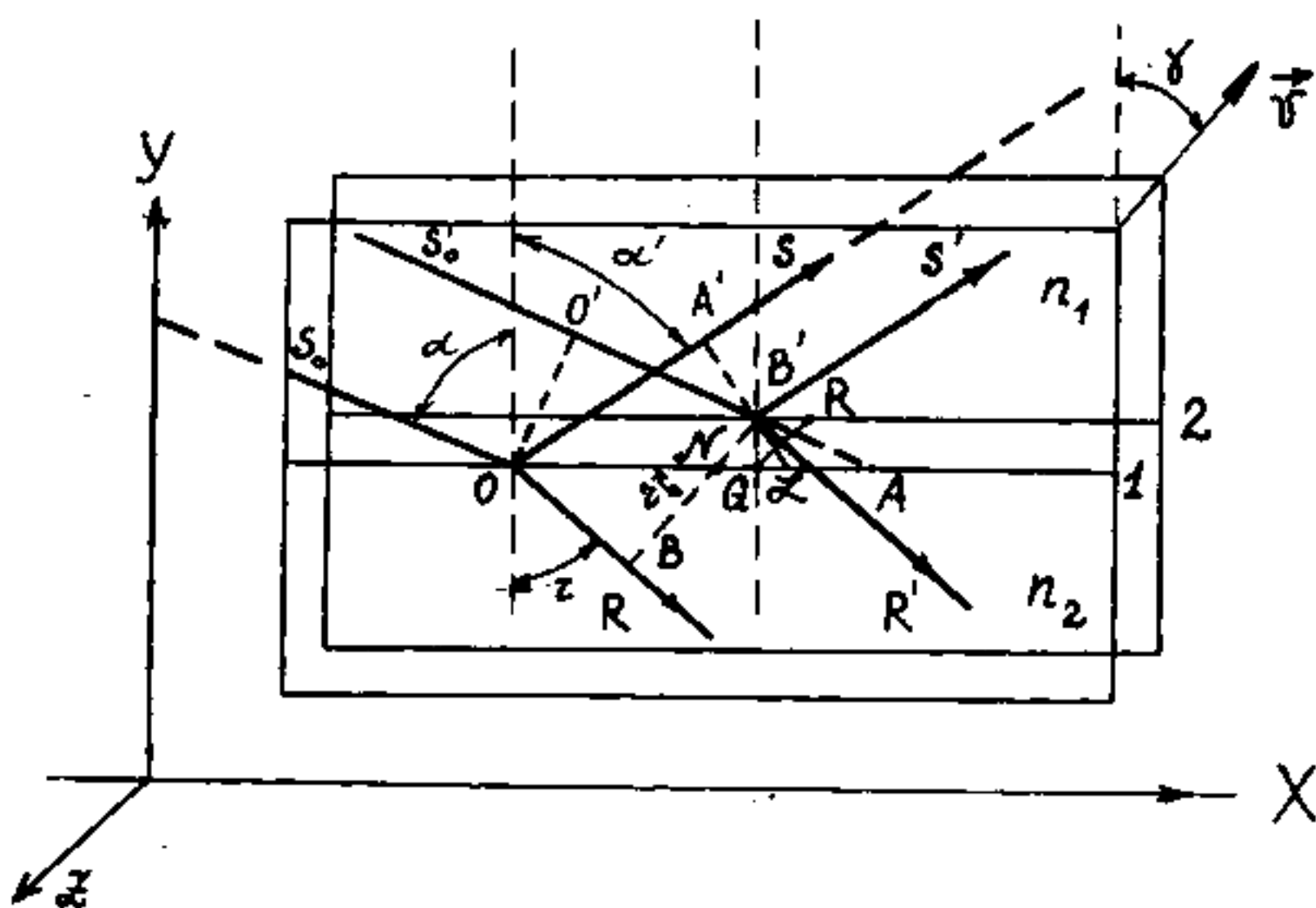
движение относительно эфира невозможно обнаружить в таком опыте при любой точности измерений смещения полос. Следует подчеркнуть, что в опытах Миллера, Майкельсона, Писа и Пирсона (1921-1929 гг.) световые пучки ограждались только стеклом или картоном, но не металлом. Итак, при правильной постановке опыта необходимо избегать экранировки световых пучков деталями установки от внешнего пространства.

Таким образом, отсутствие однозначного вывода о наличии эфирного ветра во всех опытах может быть обусловлено, с одной стороны, малостью эффекта, а с другой, невыполнением тождественности условий эксперимента (различная высота, экранировка и т.п.). В случае, если в соответствии с гипотезой Стокса Земля действительно одета переходным слоем с градиентом эфирного ветра, то окончательный ответ на этот вопрос мог бы быть получен при проведении эксперимента вне этого слоя (например, на орбите космического корабля). Поскольку достаточная чувствительность схемы Майкельсона, да и любого интерферометра в этом опыте, может быть обеспечена лишь при больших габаритах установки (длина плеч не менее 20 м), это существенно затрудняет проведение эксперимента в космосе. Поэтому целесообразно использовать другой принцип для обнаружения эфирного ветра, основанный на использовании линейной зависимости от $\beta = v/c$, где c - скорость света в вакууме, v - скорость эфирного ветра.

В настоящей работе обсуждается один из возможных линейных по β способов, пригодных для его применения в космосе. Предполагаемый принцип эксперимента основан на измерении зависимости углов падения, отражения, преломления от скорости движения прибора.

Первоначально рассмотрим, как влияет движение отрадающей (преломляющей) поверхности относительно вакуума (эфира) на формирование отраженной (преломленной) волны, т.е. в конечном итоге на углы отражения (преломления). Пусть система, состоящая из источника света и отражающей (преломляющей) поверхности раздела двух прозрачных сред с разными показателями преломления (рис. I), движется со скоростью \vec{U} относительно неподвижной системы координат X, Y, Z , которая связана с вакуумом (эфиром). Для простоты положим, что вектор скорости \vec{U} лежит в плоскости чертежа и составляет угол γ с нормалью к поверхности раздела сред.

Рассмотрим, как формируется отраженная волна, если угол падения параллельного пучка света $S_0 S'_0$ равен α , а граница раздела при своем движении последовательно занимает положения I и 2 в моменты времени, когда соответственно левый (точка O) и правый (точка O') край



пучка ($S_0 S_0'$) достигают отражающей поверхности. В соответствии с принципом Гюйгенса в этом случае точки O и B' границы раздела двух сред становятся источниками сферических (в системе X, Y, Z) волн, а касательная $A'B'$ к этим волнам является волновым фронтом отраженной волны. Направление этой волны можно определить из связи между углами падения α и отражения α' , которую легко установить из треугольников $A'ZO, OO'A, QBA, B'Q, QB'R$. Необходимые для расчета соотношения приведены ниже:

$$\sin \alpha' = \frac{OA'}{OZ} = \frac{OA'}{OA - ZA} ; \quad OA = \frac{OA}{\sin \alpha} = \frac{OB + BA}{\sin \alpha} ;$$

$$QA = QB' \operatorname{tg} \alpha ; \quad B'A = \frac{OB'}{\cos \alpha} ; \quad ZA = QA - QZ ; \quad QZ = \frac{QB'}{\operatorname{tg} \alpha'} ,$$

$$QB' = QR \cos \gamma , \quad (QR = v\tau , \quad \text{где } v = |\vec{v}| ,$$

τ - время, необходимое для перемещения прибора из положения 1 в положение 2.

В системе X, Y, Z точка O' за время τ движется до встречи с B' со скоростью $g_{O'B'} = c/n_1 + \kappa_1 v'_{O'B'}$ [5], где c - скорость света в вакууме, κ_1 коэффициент увлечения света средой, равный $\kappa_1 = (1 - 1/n_1^2)$, а проекция скорости прибора на направление света $v'_{O'B'} = -v \cos(\alpha + \gamma)$. За это же

время τ фронт сферической волны, выходящей из точки O , пре-
одолевает расстояние OA' со скоростью $g_{OA'} = c/n_1 + x_1 v_{OA'}$, где про-
екция скорости на OA' равна $v_{OA'} = v \cos(\alpha - \delta)$. Отсюда можно
записать $OA' = g_{OA'} \tau$, $OB' = g_{OB'} \tau$, и после использования
всех приведенных соотношений и простых преобразований можно получить

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = 1 + \frac{2\beta}{n_1} \cos \alpha \cos \delta \quad (5)$$

Здесь при расчете были оставлены только линейные члены по β , так
как $\beta \ll 1$. Из выражения (5), таким образом, следует зависи-
мость угла отражения света от величины и направления скорости дви-
жения отражающей поверхности. В частном случае, когда прибор непод-
вижен ($v=0$, $\beta=0$), имеет место обычный закон Снеллиуса

$\sin \alpha = \sin \alpha'$. С другой стороны, для наблюдателя, находящегося в сис-
теме координат, жестко связанной с прибором (X', Y', Z'), это
выражение (5) необходимо изменить с учетом явления аберрации лучей,
обнаруженного ранее экспериментально Брадлеем [5]. Это явление при-
водит к тому, что в инерциальной движущейся системе координат $X'Y'Z'$
углы падения (α_g) и отражения (α'_g) уже не равны соответствен-
но α и α' , а связаны с ними соотношениями

$$\alpha = \alpha_g + \varphi \quad ; \quad \alpha' = \alpha'_g + \varphi' \quad , \quad (6)$$

где углы аберрации для пучков $S_0S'_0$ и SS' равны $\varphi = \frac{\beta}{n_1} \sin(\alpha + \delta)$
и $\varphi' = \frac{\beta}{n_1} \sin(\delta - \alpha')$, соответственно. Подстановка (6) в (5)
приводит к $\sin \alpha_g = \sin \alpha'_g$, т.е. к физической инвариантности
закона Снеллиуса. Таким образом, этот вывод, основанный на гипотезе
эфирного ветра, подчиняется теореме Лоренца и совпадает с гипотезой
Эйнштейна о независимости физических законов от движения. Однако ин-
вариантность законов Снеллиуса не исключает возможность обнаружить
движение прибора наблюдателем, находящимся в системе координат самого
прибора. Этот вывод следует из зависимости углов падения и отражения
лучей в приборе (α_g и α'_g) от параметров v и δ (см. (6)).
Аналогичный вывод можно получить и для угла преломления γ . Дей-
ствительно, угол преломления в системе координат XYZ при нали-
чии движения связан с углом α соотношением

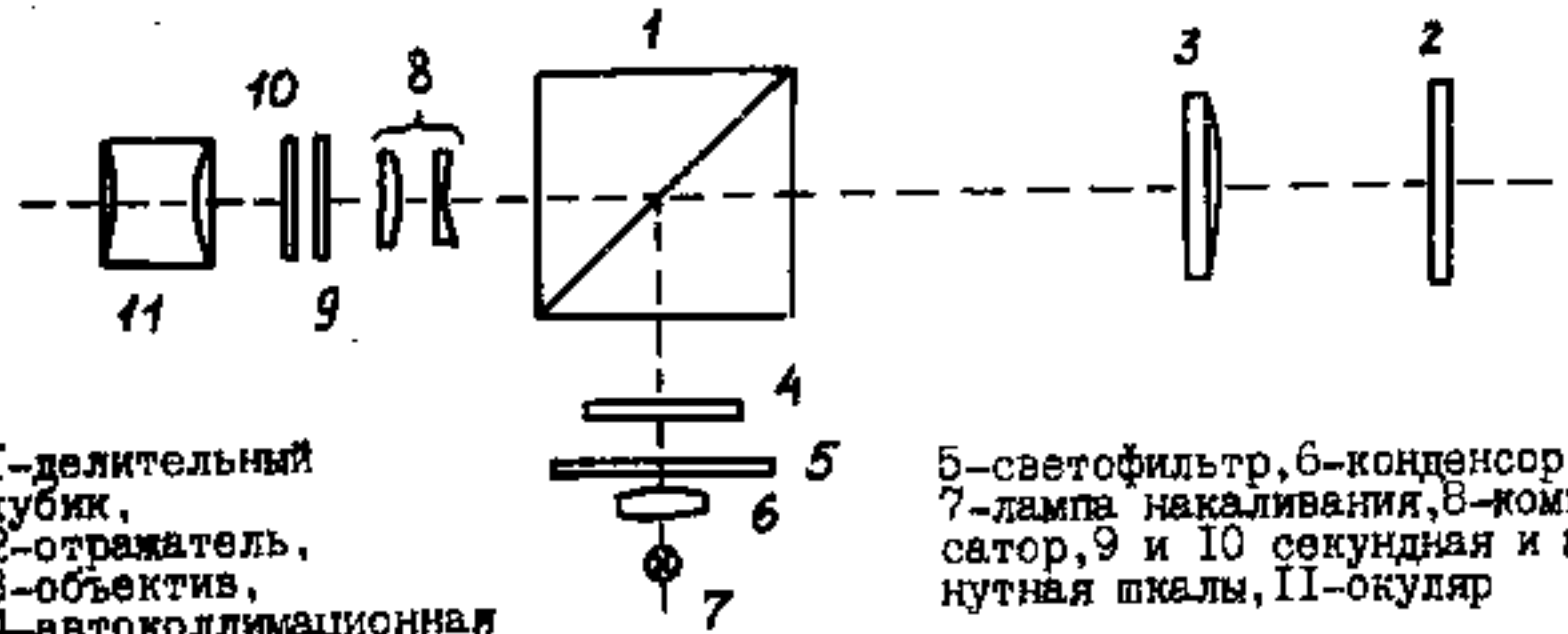
$$\sin \tau = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \left\{ 1 + \beta \left[\cos \delta \left(\frac{\cos \tau}{n_2} - \frac{\cos \alpha}{n_1} \right) + \sin \delta \sin \alpha \left(\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_1 n_2^2} \right) \right] \right\} \quad (7)$$

Эта формула получена аналогичными (5) расчетами из ΔOBN (рис. I) для угла $\angle ONB$, $\sin \tau = \frac{OB}{ON} = \frac{OB}{ON - NA}$, где $OB = \left(\frac{c}{n_2} + \alpha_2 v'_{OB} \right) \tau$,

$$\alpha_2 = \left(1 - 1/n_2^2 \right), \quad v'_{OB} = -v \cos(\delta + \tau), \quad NA = NQ + QA, \\ NQ = BQ / \operatorname{tg} \tau.$$

Для перехода в систему координат прибора $X'Y'Z'$ используем выражение для угла абберации преломленного луча $\tau_g - \tau = \frac{\beta}{n_2} \sin(\delta + \tau)$ (8) и после подстановки значений α и τ из (6) и (8) в формулу (7) получим $\sin \tau_g = \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha_g$, что также говорит об инвариантности закона преломления. Таким образом, оба закона Снеллиуса физически инвариантны по отношению к движению. Однако соотношения (6) и (8) указывают на зависимость самих углов падения и преломления лучков света в приборе от его движения. Конечно, это справедливо только в случае, когда эфир не увлекается (или частично увлекается) самим прибором. Итак, соотношения (6) и (8) могут быть использованы для обнаружения эфирного ветра.

Несомненным преимуществом такого метода по сравнению с опытом Майкельсона является возможность создания малогабаритного прибора с повышенной вибростойкостью, помехозащищенностью и чувствительностью, достаточной для обнаружения эфирного ветра. На рисунке 2 приводится схема предлагаемого прибора. Прибор выполнен на базе автоколлиматора АК-1, имеет размеры 350x100x120 и вес не более 2,5 кг (без фотоаппарата).



1-делительный кубик,
2-отражатель,
3-объектив,
4-автоколлимационная метка

5-светофильтр, 6-конденсор,
7-лампа накаливания, 8-компенсатор, 9 и 10 секундная и минутная шкалы, 11-окуляр

Принцип действия прибора следующий. Изображение автоколлимационной метки 5 при помощи выносного отражателя 2 формируется в окуляре, где одновременно проектируется сетка секундной измерительной шкалы. Все детали закреплены жестко настолько, что внешние воздействия (вибрации, тепловые помехи, засветка и т.п.) не оказывают влияния на смещение изображения автоколлимационной метки относительно ее первоначально установленного положения. Как показал опыт, проведенный вблизи поверхности Земли, положение метки не изменялось ни в зависимости от ориентации прибора, ни от изменений внешних условий (разное время суток, погодные условия, помехи и т.п.). Этому результату и следовало ожидать в соответствии с гипотезой полного увлечения эфира Землей вблизи ее поверхности, где скорость эфирного ветра равна нулю.

Проведение эксперимента за пределами переходного слоя (в космосе) позволит надеяться уверенно обнаружить смещение автоколлимационной метки. Действительно, в соответствии с формулой (6) для $\varphi(\delta) = \frac{\beta}{n_1} \sin(\delta + \alpha)$, где для нашего случая $n_1 = 1$, $\alpha = 0$, δ - угол, отсчитываемый от нормали к зеркалу 2 по часовой стрелке, можно получать максимальное угловое смещение в случае $\delta = \pm \pi/2$ при повороте всего прибора на 180° , равное $\Delta\varphi = \varphi(+\pi/2) - \varphi(-\pi/2) = 2\beta$. Точность измерения угловых смещений данного прибора не хуже $3''$, что позволило бы обнаружить $\Delta\varphi > 3''$, т.е. эфирный ветер со скоростью не менее $\sim 2,5$ км/с. За пределами переходного слоя Земли (в космосе) ожидаемая скорость эфирного ветра, обусловленная движением Земли по орбите, составляет 30 км/с, что на порядок величины превышает предел чувствительности прибора.

В данном случае значение 2,5 км/с не является принципиальным пределом этого способа наблюдения, а может быть значительно снижено применением более точных автоколлиматоров, т.е., конечно, за счет увеличения веса и габаритов. Довольно высокая удельная чувствительность предлагаемого прибора (2,5 км/с) достаточна также для обнаружения его движения относительно Земли. В этом случае измерение можно делать вблизи поверхности Земли, т.е. внутри переходного слоя эфира, увлекаемого ее движением по орбите. Например, при скорости прибора 6 км/с относительно Земли максимальное угловое смещение автоколлимационной метки при повороте прибора на 180° относительно положения $\delta = +\pi/2$ должно быть равно $\sim 10''$, что вполне достаточно для уверенной регистрации. Такой вариант опыта более предпочтителен, поскольку полностью снимает неопределенность в вопросе о характеристиках переходного слоя.

Во избежание возможной экранировки эфирного ветра различными деталями установки необходимо зеркало 2 (рис.2) удалить как можно дальше от корпуса автоколлиматора, а само зеркало и его держатель изготовить из материала, для которого коэффициент увлечения $\mathcal{E} \neq 1$. В нашем случае стеклянное зеркало 2 с диэлектрическим покрытием приклеено к торцу длинного (20 см) бруска из стекла К-8, который другим концом жестко закреплен в юстировочном узле.

Возможны различные варианты в проведении экспериментов такого типа. Например, вся оптическая система автоколлиматора устанавливается внутри космического корабля, а зеркало 2 выносится по возможности дальше от корпуса корабля, закрепляется на выдвижном штативе и юстируется при $\alpha = 0$, $\gamma = \pi/2$. В этом случае максимальное смещение автоколлимационной метки следует искать при повороте всего корабля на 180° вокруг оптической оси автоколлиматора из начального положения $\gamma = \pi/2$. Проведение эксперимента с предлагаемым прибором на больших высотах (более 200 км) позволит выйти за область переходного слоя уплотненного эфира и окончательно решить вопрос о возможности обнаружения эфирного ветра. В случае получения отрицательного результата он послужит дополнительным решающим экспериментальным подтверждением выводов, которые были сделаны из отрицательного результата опыта Майкельсона и привели к созданию специальной теории относительности. Это позволит положить конец практически непрекращающимся попыткам повторения на все более высоком уровне такого дорогостоящего и сложного эксперимента, как опыт Майкельсона.

Л и т е р а т у р а

1. Эйнштейн А. - Собр.науч.тр., 1966, т.2, с.154-160.
2. Эйнштейн А.- Собр.науч.тр., 1965, т.1, с.138-164.
3. Дубровский В.А.- ДАН СССР, 1965, т.282, с.1,83.
4. Лоренц Г.А. Теория электронов и ее применение к явлениям света и теплового излучения. М., 1956.
5. Лансберг Г.С. Оптика. М., 1976.
6. Миллер Д.К.- УФН, 1925, т.5, вып.3, с.177-165.