

ЭФИРНЫЙ ВЕТЕР ¹⁾.

Дэйтон К. Миллер.

При установлении волновой теории света необходимо было допустить существование всепроникающей среды, в которой могут возникать и распространяться волны; эта гипотетическая среда была названа „эфиром“. Эфир был наделен теми свойствами, которые были необходимы для объяснения наблюдаемых явлений. Многие физики пытались обнаружить существование эфира прямым экспериментом. Наиболее важный из проектов подобных опытов предложен А. А. Майкельсоном в 1881 г. и основан на представлении о том, что эфир, как целое, находится в покое и что световые волны распространяются в свободном эфире во всех направлениях и всегда с одной и той же скоростью по отношению к эфиру. Допускалось также, что земля при своем движении вокруг солнца свободно проходит сквозь эфир, при чем последний остается совершенно неподвижным в пространстве. Опыт, предложенный Майкельсоном, должен был открыть относительное движение земли и эфира, которое часто называется „эфирным ветром“ (ether drift). Этот опыт основан на том положении, что кажущаяся скорость света изменяется в зависимости от того, перемещается ли наблюдатель вместе с землей по линии распространения света, или перпендикулярно этой линии. Скорость света равняется 300 000 километрам в секунду, а скорость земли составляет одну десятитысячную скорости света и равна тридцати километрам в секунду. Если орбитальная скорость земли в данном случае действует непосредственно, то обе кажущиеся скорости должны различаться на 30 километров в секунду или на одну десятитысячную. Однако не существует методов измерения скорости света при таких простых условиях. Во всех методах необходимо, чтобы луч света проходил до удаленной точки и возвращался обратно в исходную точку, при чем положительный эффект движения земли, сказывающийся на луче, идущем вперед, должен бы

¹⁾ Доклад, читанный в Вашингтонской Академии Наук. Опубликовано в Science and Proceedings of the National Academy of Sciences of U. S. A. 11. p. 1925. Оба текста, хотя и отличаются по полноте отдельных частей, приняты во внимание при настоящем переводе.

нейтрализоваться на луче, идущем обратно. Однако для движущегося наблюдателя было показано, что нейтрализация не будет полной, кажущаяся скорость луча, идущего в ту и другую сторону по направлению движения земли, должна отличаться от кажущейся скорости луча, идущего перпендикулярно в ту и другую сторону, в отношении квадрата скорости земли к квадрату скорости света, т.-е. $(0,0001)$ или $0,00000001$.

Ничтожные разности скоростей, обусловленные эфирным ветром, можно обнаружить замечательным инструментом, так называемым интерферометром, придуманным Майкельсоном. В этом приборе пучок света расщепляется на два при помощи так называемого „подупосеребренного“ зеркала, в котором слой серебра настолько тонок, что приблизительно половина пучка проходит сквозь него, а остальная половина отражается обычным способом. Таким образом эти два пучка проходят в направлении перпендикулярном друг к другу. На конце пути каждого из этих пучков имеется по зеркалу, от которых они отражаются и возвращаются в исходную точку. Если пути обоих пучков оптически равны, т.-е. если на них укладывается одно и то же число световых волн, то, воссоединяясь, они находятся в одинаковых фазах. Если же один путь длиннее другого на полволны, то волны соединяются в противоположных фазах, так что вершина одной из них совпадает с углублением другой. В результате получаются так называемые „интерференционные полосы“, наблюдение которых позволяет открыть незначительные изменения в скорости света на том и другом пути.

В 1887 г. Майкельсон в сотрудничестве с Эдвардом В. Морлеем сделал существенное улучшение в методе и приборах и использовал интерферометр с целью открыть, производит ли движение земли в эфире предсказываемые теорией влияния. К сожалению, мы не знаем, в каком абсолютном направлении движется земля в пространстве, и потому невозможно установить интерферометр точно в этом направлении. Поэтому весь аппарат установлен на фундаменте, который плавал в ртути, так что прибор можно было поворачивать во всех азимутах горизонтальной плоскости наблюдения. Вращение земли около оси заставляет плоскость интерферометра двигаться по поверхности конуса, осью которого служит ось земли и таким образом придает прибору различную ориентировку. Наблюдению же доступна только та компонента действительного „эфирного ветра“, которая лежит в горизонтальной плоскости интерферометра. Поэтому кажущийся азимут и величина эфирного ветра должны изменяться в зависимости от времени наблюдения. Ветер, перпендикулярный к плоскости интерферометра, не должен вообще вызывать эффекта; вполне возможно, что такие условия осуществляются в известные времена года.

Я не могу сейчас излагать деталей этого эксперимента. Наблюдения состояли в рассматривании при помощи телескопа системы интер-

френционных полос, образованных двумя пучками света. При вращении интерферометра вокруг оси эфирный ветер должен вызывать колебания всей системы полос, которые движутся сначала в одну сторону, потом в другую, при чем так, что период этого колебания составляет половину времени обращения интерферометра вокруг его вертикальной оси. Для относительного движения земли и эфира, равного орбитальной скорости земли, т.-е. 30 километров в секунду, смещение в первоначальном опыте Майкельсона и Морлея должно было составлять 0,4 полосы.

В ноябре 1887 г. Майкельсон и Морлей опубликовали заключения, выведенные из наблюдений, сделанных в июле этого года. Эти заключения они формулировали следующим образом: „если учитывать только движение земли по ее орбите..., то наблюдение показывает, что относительное движение земли и эфира, вероятно, меньше одной шестой орбитальной скорости земли и наверное меньше одной четверти ее“ (т.-е. меньше семи с половиной километров в секунду). Этот результат, который был истолкован многими, как нулевой результат, или, как часто говорят, отрицательный результат, возбудил у многих серьезные сомнения в справедливости гипотезы светового эфира. Однако в отчете Майкельсона и Морлея имеется важное „добавление“, которое начинается следующим замечанием: „но не представляется невозможным, что даже на умеренной высоте над уровнем моря, например, на вершине изолированной горы, относительное движение может быть ощутительно для аппарата, подобного использованному в наших опытах“.

На международном конгрессе физиков в Париже в 1900 г. лорд Кельвин произнес речь, в которой он рассматривал теории эфира. Он заметил, что „единственное облако на ясном небосклоне теории есть нулевой результат опытов Майкельсона и Морлея“. Морлей и автор присутствовали на конгрессе и при разговоре с лордом Кельвином последний выразил уверенность, что опыт будет повторен с более чувствительными приборами. Автор в сотрудничестве с Морлеем построил интерферометр приблизительно в 4 раза более чувствительный, нежели прибор, использованный в первом опыте, при чем длина пути в последнем приборе составляла 220 футов, и на ней укладывалось приблизительно 150.000.000 волн. В этом приборе относительная скорость земли и эфира, равная орбитальной скорости земли, должна была сказываться в смещении интерференционных полос на $1\frac{1}{2}$ полосы. Именно такой прибор и употреблялся все время с тех пор. Оптические части его были совершенно новые, и вообще из первоначальной аппаратуры не было использовано ничего, за исключением резервуара с ртутью и деревянного поплавка.

Подобный прибор с фундаментом, сделанным из деревянных брусков, употреблялся в 1902 и 1903 гг., но изменения в деревянной раме

вследствие вариации влажности и температуры делали точные измерения невозможными. Инженер проф. Нэф сконструировал новую опорную раму, отличающуюся жесткостью и симметрией. Эта рама или фундамент была построена из стали и установлена в подвальном помещении физической лаборатории школы прикладных знаний в Клевеланде; наблюдения с нею производились в 1904—5 гг. Результаты этих наблюдений были опубликованы в *Philosophical Magazine* за май 1905 г. Эти результаты были сформулированы следующим образом: „Поэтому мы можем утверждать, что опыт показывает, что эфир вблизи аппарата не двигается вместе с ним; разность скоростей меньше 3,5 килом. в секунду, если только дефекты постановки опыта не аннулируют влияние увлечения. Некоторые думают, что этот опыт показывает только, что эфир в некоторых подвальных помещениях не двигается вместе с ними. Мы хотим поэтому расположить аппарат на вершине, чтобы посмотреть, не может ли быть там открыт эффект“.

Именно в это время вопросом заинтересовался Эйнштейн, который опубликовал в 1905 г. работу под названием „Электродинамика движущихся тел“. Эта работа была первой в длинном ряду статей Эйнштейна и других, которые развили современную теорию относительности. В упомянутой первой работе Эйнштейн выставляет принцип постоянства скорости света, утверждая, что для наблюдателя на движущейся земле измеренная скорость света должна быть постоянна, независимо от направления и величины скорости движения земли. Главным физическим фундаментом теории относительности является допущение, что опыты с эфирным ветром дали определенный результат. Однако истолкование этого опыта для автора было неприемлемо, и для разрешения вопроса были предприняты дальнейшие наблюдения.

Осенью 1905 г. Морлей и Миллер перенесли интерферометр из подвального помещения лаборатории на Эвклидовы высоты близ Клевеланда, на высоту приблизительно около 300 футов над озером Эри, в место, свободное от всяких преград и построек. Было сделано пять серий наблюдений (1905—6 гг.), которые дали определенный положительный эффект, равный приблизительно $1/10$ ожидаемого ветра. Существовало подозрение, что это могло быть вызвано влиянием температуры, однако, прямых указаний на это не было. Предполагалось проверить это подозрение после летних вакаций. Но интерферометр был установлен на земле, принадлежащей нашему другу; в течение нашего отсутствия летом земля была продана, и новый владелец потребовал, чтобы интерферометр немедленно был убран.

Проф. Морлей отстранился от активной работы в 1906 г., и продолжение экспериментов перешло в руки автора этих строк. Представлялось желательным, чтобы дальнейшие наблюдения были произведены на большей высоте, но многочисленные препятствия мешали продолжению работы. Опубликование результатов наблюдений над солнечным

затмением 1919 г., которое было истолковано, как подтверждение теории относительности, вновь пробудило интерес к опытам с эфирным ветром. Щедрый друг ассигновал достаточные материальные средства для покрытия значительных издержек, связанных с повторением опытов. Обсерватория на Моунт Вильсон, вблизи Пасадены в Калифорнии, на высоте 6000 футов представлялась желательным местом для дальнейшей работы. Благодаря любезности м-ра Мерриама, президента Института Карнеги в Вашингтоне, и директоров обсерватории Гэля и Адамса, опыты были возобновлены автором в марте и апреле 1921 г. в обсерватории на Моунт Вильсон. Аппарат в существенном был тот же самый, какой использовался Морлеем и Миллером в 1904, 1905, и 1906 гг. Наблюдения также производились в конце 1921 г. и вновь — в 1924 и 1925 гг.

Всего на Моунт Вильсон было произведено около 5 000 отдельных измерений эфирного ветра в различные часы дня и ночи. Эти наблюдения были сведены в 204 различных серии, при чем каждая серия относилась к одному часу времени. Наблюдения были сделаны в четыре различных времени года: I. 15 апреля 1921 г.: 117 серий наблюдений. II. 8 декабря 1921 г.: 42 серии. III. 5 сентября 1924 г.: 10 серий. IV. 1 апреля 1925 г.: 35 серий.

I. Самые первые наблюдения, сделанные в марте 1921 г., дали положительный эффект, соответствующий реальному эфирному ветру, как если бы он был обусловлен относительным движением земли и эфира со скоростью около 10 км/сек . Однако, прежде чем опубликовать этот результат, представлялось необходимым изучить все возможные причины, которые могли бы вызвать эффект, подобный эфирному ветру. Эти возможные причины могли бы сводиться к магнитным деформациям стальной рамы интерферометра и влияниям лучистой теплоты. С целью полностью устранить эффект лучистой теплоты металлические части интерферометра были совершенно закрыты слоем пробки толщиной около одного дюйма. Пятьдесят серий наблюдений, сделанных при этих условиях, обнаружили периодическое смещение полос, совпадающее с прежними наблюдениями.

II. Летом 1921 г. стальная рама интерферометра была разобрана. На место нее на ртутном поплавке был установлен бетонный фундамент, укрепленный латунными стержнями. Для оптических частей были сделаны новые подставки из алюминия или латуни. Таким образом аппарат был совершенно не подвержен магнитным влияниям, и возможные эффекты нагревания значительно уменьшены.

В декабре (4—11) 1921 г. было сделано около 900 отдельных наблюдений, сведенных в 42 серии. Результаты с таким немагнитным интерферометром дали положительный эффект, соответствующий эфирному ветру точно той же величины и направления, какие были получены в апреле 1921 г.

Были перепробованы многочисленные вариации условий опыта. Наблюдения производились при вращении интерферометра по часовой стрелке и против часовой стрелки; при быстром вращении (1 оборот в 40 сек) и при медленном вращении (1 оборот в 85 сек); с тяжелым грузом, положенным на кронштейн трубы, а затем на кронштейн лампы; с поплавком, высоко поднятым над уровнем ртути вследствие того, что сначала нагружался один квадрант, а потом другой квадрант. Ассистент, записывавший наблюдения, ходил вокруг или же стоял в различных частях помещения, далеко от аппарата или же близко к нему. На результаты наблюдений ни одна из этих вариаций не оказывала никакого влияния.

Затем весь аппарат был перенесен обратно в Клевеланд. В течение 1922 и 1923 г. было произведено множество испытаний при разнообразных условиях, доступных контролю, и с различными видоизменениями в расположении частей аппарата. Зеркала и призмы были расположены таким образом, что источник света мог находиться вне помещения, где производились опыты, при чем свет входил во вращающийся интерферометр вдоль оси вращения. Этот метод обычно применялся во всех наблюдениях эпохи III и IV. Другое расположение зеркал, на практике оказавшееся очень сложным, позволяло наблюдать полосы неподвижным телескопом; необходимость частой установки полос в поле зрения делала этот метод непрактичным. Были проделаны также опыты с фотографической регистрацией положения полос с некоторого фиксированного места наблюдения, так и при помощи кинематографической камеры, перемещавшейся с интерферометром. Однако даже дуговая лампа в качестве источника не давала достаточно яркого освещения для получения удовлетворительных фотографий; кроме того, необходимость частой установки полос делала этот метод неподходящим. После того как фотографический метод был оставлен, в соединении с интерферометром был монтирован астрономический телескоп с отверстием в 5 дюймов и с фокусным расстоянием в 75 дюймов. При увеличении в 50 диаметров полосы наблюдались в большом масштабе и при ярком освещении, так что непосредственные отсчеты глазом были весьма удовлетворительны; это расположение с тех пор употреблялось постоянно. Были испробованы также разные источники света: электрическая дуга, лампа накаливания, ртутная дуга, ацетиленовая лампа и, наконец, солнечный свет. Замена солнечным светом лабораторных источников несколько не влияет на результат. В конце концов, в качестве постоянного источника была выбрана ацетиленовая лампа типа автомобильных фонарей, как правило, располагавшаяся вне помещения, где находился интерферометр.

Длинная серия опытов была проделана с целью изучить влияние неравенств температуры в помещении интерферометра и влияние лучистой теплоты, падающей на интерферометр. При этом использовалось несколько электрических нагревателей, устроенных таким образом, что

нагревающая спираль была расположена в фокусе вогнутого зеркала. Неравенства температуры вызывали медленное, но постоянное смещение системы полос в одну сторону, но не вызывали периодического смещения. Даже тогда, когда два нагревателя были расположены на расстоянии трех футов от интерферометра, находившегося во вращении, и посылали тепло непосредственно к непокрытой стальной раме, измеримого периодического эффекта не наблюдалось. Когда же нагреватели были обращены к путям световых лучей закрытым стеклом, периодический эффект наблюдался, но только тогда, когда стекло было покрыто непрозрачным материалом, и притом весьма несимметричным образом, когда, например, одно плечо интерферометра было совершенно защищено картоном, а другое не защищено. Эти опыты показали, что при тех условиях, при каких в действительности производится опыт, периодическое смещение полос не может быть вызвано влиянием температуры.

Лабораторное исследование показало, что эффект „полного периода“, упомянутый в предварительном сообщении о наблюдениях на Моунт Вильсон в апреле 1921 г., есть необходимый геометрически результат установки зеркал при получении полос конечной ширины. При низкой температуре, какая была на Моунт Вильсон в апреле 1921 г., необходимо было пользоваться узкими полосами, а в этом случае „эффект полного периода“ относительно велик; по мере увеличения ширины полос этот эффект уменьшается и полностью исчезает лишь при полосах бесконечной ширины, как это и предполагается в простой теории опыта.

III. После окончания описанных опытов интерферометр был вновь перенесен на Моунт Вильсон. В 1921 г. аппарат был расположен в глубоком каньоне. Я опасался, что потоки воздуха в каньоне могут внести нарушения; равным образом несимметричное распределение горных пород вокруг представлялось нежелательным. В августе 1924 г. было выбрано новое место на слегка закругленном холме, удаленном от каньонов. Помещение для интерферометра было возведено так, что его ориентировка — направление конька крыши и расположение дверей — составляла 90° с ориентировкой 1921 г. Интерферометр во всех деталях был тот же, что употреблялся в Клевеланде в июле 1924 г. В сентябре—4, 5 и 6—1924 г. было произведено 275 измерений смещения полос, при чем измерения были расположены в 10 сериях. Результаты наблюдений обнаружили определенное смещение, в противоположность незначительным результатам, полученным в Клевеланде. Соответствующий этому смещению эфирный ветер по величине и направлению был вполне согласен с впервые наблюдаемым на Моунт Вильсон. Часть наблюдений была проделана при таких условиях, что пути световых лучей были прикрыты стеклянными ящиками, обложенными сверху гофрированной бумагой, которая — как показали опыты в Клевеланде — совершенно исключает влияние лучистой теплоты. Однако эти покрывки

несколько не изменили результата, откуда следует, что таких нарушений вообще нет.

IV. Наблюдения на Моунт Вильсон были возобновлены 27 марта 1925 г. и продолжались до 9 апреля. В этот промежуток времени было сделано 1600 измерений, расположенных в 35 сериях. Интерферометр был тот же, что и в сентябре 1924 г. В течение первой половины измерений лампа была неподвижна и расположена вне помещения для интерферометра; в течение второй половины измерений лампа была расположена на крышке интерферометра вблизи оси вращения, благодаря чему несколько упрощалась установка. Это изменение положения источника ни малейшим образом не повлияло на результат. Ассистент занимал различные положения внутри здания, переходя из одного квадранта в другой, также без всякого влияния на результат.

В течение эпохи IV условия для наблюдений были исключительно хороши. Некоторое время стоял туман, который поддерживал температуру весьма равномерной. Четыре точных термометра были повешены на внешних стенах домика, во многих случаях вариации температуры не превышали $0,1^{\circ}$ и обычно были меньше $0,4^{\circ}$. Однако даже изменение на несколько градусов, которое может вызвать постоянное смещение полос интерференции, не может изменить периодического смещения ни по величине, ни по направлению.

Наблюдения в апреле 1925 г. дали результаты совершенно тождественные с результатами апреля 1921 г., несмотря на то, что интерферометр был пересмотрен, что применялась другая система освещения и иные методы наблюдения, несмотря на то, наконец, что интерферометр был установлен в другом месте и в доме, иначе ориентированном.

Наблюдения, будучи нанесены на графики при помощи гармонического анализа (выполненного механическим анализатором), непосредственно давали азимут и величину эфирного ветра. Никаких поправок в наблюденные величины не вносилось; до сих пор все отчеты эфирного ветра, сделанные на Моунт Вильсон, включались своими полными значениями. Ни одно наблюдение не было опущено, если бы даже оно показалось недостаточным, и никаких „весов“ наблюдениям не приписывалось, так как не делалось никаких допущений относительно ожидаемого результата. Можно еще добавить, что в то время, как делались отсчеты, ни наблюдатель, ни тот, кто записывал отсчеты, не могли составить себе малейшего понятия о том, существует ли периодичность, ни — тем более — о направлении или величине этой периодичности.

Если эти наблюдения верны, то они должны давать определенные указания на движение всей солнечной системы в пространстве, комбинарованное с орбитальным движением земли и суточным вращением ее около оси. Должно существовать особое соотношение для данной широты между наблюденным азимутом эфирного ветра и сидерическим временем наблюдения. Наблюдения в различные сидерические времена

должны давать различные азимуты, и наблюдения в одно и то же сидерическое время должны давать один и тот же азимут для данной эпохи. Предварительное графическое изучение наблюдений показывает, что эти условия выполняются.

Едва ли нужно говорить о том, что определение абсолютного движения солнечной системы из таких интерферометрических наблюдений в высшей степени сложно. Проф. Нассау (J. J. Nassau) и д-р Штрёмберг (G. Strömberg) оказали весьма существенную помощь при математическом анализе и развили решения различных частей проблемы, а также полное решение общей проблемы по методу наименьших квадратов. Окончательные числовые расчеты требуют нескольких месяцев непрерывной работы и в настоящее время в ходу.

Описанные опыты, выполненные на Моунт Вильсон в течение четырех последних лет, — 1921—1925 гг. — приводят к заключению, что существует определенное смещение интерференционных полос, такое, какое было бы вызвано относительным движением земли и эфира на этой обсерватории со скоростью приблизительно $10 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$, т.-е. около одной трети орбитальной скорости земли. При сравнении этого результата с прежними результатами, полученными в Клевеланде, напрашивается мысль о частичном увлечении эфира, которое уменьшается с высотой. Думается, что пересмотр Клевеландских наблюдений с этой точки зрения должен показать, что они находятся в согласии с подобным предположением, и привести к заключению, что опыт Майкельсона-Морлея не должен давать нулевого результата в точном смысле слова и, по всей вероятности, никогда такого результата не давал. Полная обработка результатов опытов, которая будет закончена в ближайшем будущем, должна дать определенные указания относительно абсолютного движения солнечной системы в пространстве.
