

10. Эфирный ветер Д.К.Миллер

Доклад, прочитанный в Вашингтонской академии наук

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, причем последний остается совершенно неподвижным в пространстве. Опыт, предложенный Майкельсоном, должен был открыть относительное движение Земли и эфира, которое часто называют "эфирным ветром".

Этот опыт основан на том предположении, 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 км/с, а скорость Земли составляет одну десятитысячную скорости света и равна 30 км/с. Если орбитальная скорость Земли в данном случае действует непосредственно, то обе кажущиеся скорости должны различаться на 30 км/с 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, причем положительный эффект движения Земли, сказывающийся на луче, идущем вперед, должен был 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 или другую сторону, в том же направлении, что и квадрат скорости Земли к квадрату скорости света, т.е. $(0,0001)^2$ 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 полупрозрачного зеркала, в котором слой серебра настолько тонок, что приблизительно половина лучка проходит сквозь него, а остальная половина отражается обычным способом. Таким образом, эти два пучка проходят в направлении, перпендикулярном друг другу. На конце пути каждого из этих пучков имеется по зеркалу, от которых они отражаются и возвращаются в исходную точку. Если пути обоих пучков равны, т.е. если на них укладывается одно и то же число световых волн, то, соединяясь, 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. Морли существенно улучшил метод и приборы и использовал интерферометр с целью открыть, производит ли движение Земли в эфире предсказываемые теорией явления. К сожалению, мы не знаем, в каком абсолютном направлении движется Земля в пространстве, и поэтому невозможно установить интерферометр точно в этом направлении. Поэтому весь аппарат был установлен на фундаменте, который плавал в ртути, так что прибор можно было поворачивать по всем азимутам горизонтальной плоскости наблюдений. 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 доступен только тот компонент действительного "эфирного ветра", который лежит в горизонтальной плоскости интерферометра. Поэтому кажущийся азимут и скорость эфирного ветра должны изменяться в зависимости от времени наблюдения. Ветер, перпендикулярный плоскости интерферометра, не должен вообще вызывать эффекта, вполне возможно, что такие условия осуществляются в известные времена года.

Я не могу сейчас излагать детали этого эксперимента. Наблюдения состояли в рассмотрении при помощи телескопа системы интерференционных 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, причем так, что период этого колебания составляет половину времени обращения интерферометра вокруг его

вертикальной оси. Для относительной скорости Земли и эфира, равной орбитальной скорости движения Земли, т.е. 30 км/с, смещение в первоначальном опыте Майкельсона и Морли должно составлять 0,4 полосы.

В ноябре 1887 г. Майкельсон и Морли опубликовали заключения, основанные на наблюдениях, проведенных в июле этого года. Эти заключения они сформулировали 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 7,5 км/с). 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 Морли имеется важное "добавление", которое начинается следующим замечанием:

"... но не представляется невозможным, что даже на умеренной высоте над уровнем моря, например, на вершине отдельно стоящей горы, относительное движение может быть ощутимым для аппарата, подобного использованному в наших опытах".

На международном конгрессе физиков в Париже в 1900 году лорд Кельвин произнес речь, в которой он рассматривал теорию эфира. Он заметил, что "единственное облако на ясном небосклоне теории есть нулевой результат опытов Майкельсона и Морли". Морли и автор присутствовали на конгрессе, и при разговоре на конгрессе последний выразил уверенность, что опыт будет повторен с более чувствительными приборами. Автор в сотрудничестве с Морли построил интерферометр, приблизительно в 4 раза более чувствительный, чем прибор, использованный в первом опыте, причем длина пути в последнем приборе составляла 250 футов, и на ней укладывалось приблизительно 150.000.000 волн. В этом приборе относительная скорость Земли должна сказываться в смещении интерференционных полос на 1,5 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 со ртутью и деревянного поплавка.

Подобный прибор с фундаментом, сделанным из деревянных брусьев, 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 Кливленде; наблюдения с ней производились в 1904-1905 гг. Результаты этих наблюдений опубликованы в *Philosophical Magazine* зимой 1905 г. Эти результаты были сформулированы следующим образом:

..." Поэтому на основании опыта мы можем утверждать, что эфир вблизи аппарата не движется вместе с ним; разность скоростей меньше 3,5 км/с, если только дефекты постановки опыта не аннулируют влияние увлечения. Некоторые думают, что этот опыт показывает только, что эфир в некоторых подвальных помещениях не движется вместе с ними. Мы хотим поэтому расположить аппарат на вершине, чтобы посмотреть, не может ли быть там обнаружен 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 постоянной, независимо от направления и 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 (разрядка моя - В.А.), и для разрешения вопроса были предприняты дальнейшие наблюдения.

Осенью 1905 г. Морли и Миллер перенесли интерферометр из подвального помещения лаборатории на Евклидовы высоты близ Кливленда, на высоту приблизительно 300 футов над озером Эри, в место, свободное от всяких преград и построек. Было сделано пять серий наблюдений (1905-1906 гг.), которые дали определенный положительный эффект, составляющий 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 отпусков. Но интерферометр был установлен на земле, принадлежащей нашему другу, в течение нашего отсутствия летом земля была продана, и новый владелец потребовал, чтобы интерферометр немедленно убрали.

Проф. Морли отстранился от активной работы в 1906 г., и продолжение экспериментов перешло в руки автора этих строк.

Представлялось желательным, чтобы дальнейшие наблюдения были проведены на большой высоте, но многочисленные препятствия мешали продолжению работы. Опубликование результатов наблюдений солнечного затмения в 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 Маунт Вилсон вблизи Пасадены в Калифорнии на высоте 6000 футов представлялась желательным местом для дальнейшей работы. Благодаря любезности м-ра Мерриама, президента Института Карпети в Вашингтоне, и директоров обсерватории Гэля и Адамса опыты были возобновлены автором в марте и апреле 1921 г. в обсерватории на Маунт Вилсон. Аппарат в основном был тот же самый, что использовался Морли и Миллером в 1904, 1905 и 1906 гг. Наблюдения также проводились в конце 1921 г. и вновь – в 1924 и 1925 гг.

Всего на Маунт Вилсон было произведено около 5000 отдельных измерений эфирного ветра в различные часы дня и ночи. Эти наблюдения были сведены в 204 различных серии, причем каждая серия относилась к одному часу времени. Наблюдения были сделаны в четыре различных времени года:

1	15 апреля 1921 г.	- 117 серий наблюдений;
2	8 декабря 1921 г.	- 42 серии
3	5 сентября 1924 г.	- 10 серий
4	1 апреля 1925 г.	- 35 серий

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/с. 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 теплоты излучения. В целях полного устранения влияния теплоты излучения металлические части интерферометра были совершенно закрыты слом пробки толщиной около одного дюйма. Пятьдесят серий наблюде-

ний, сделанных при этих условиях, обнаружили периодическое смещение полос, совпадающее с прежними наблюдениями.

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

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

Были перепробованы многочисленные вариации условий опыта. Наблюдения проводились при вращении интерферометра по часовой стрелке и против нее, при быстром (1 оборот за 40 секунд) и при медленном вращении (1 оборот за 85 секунд), 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 квадрат, а потом другой. Ассистент, записывающий 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 Кливленд. В течение 1922 и 1923 гг. было проведено 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 проводились опыты, причем свет входил во вращающийся интерферометр по оси вращения. Этот метод обычно применялся во всех наблюдениях 3- и 4- серий. Другое расположение зеркал, на практике оказавшееся очень сложным, позволяло наблюдать полосы неподвижным телескопом, однако 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, и при помощи кинематографической камеры, перемещающейся 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, с интерферометром был смонтирован астрономический телескоп с отверстием диаметром 5 дюймов и фокусным расстоянием 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 использованы также разные источники света: электрическая дуга, лампа накаливания, ртутная 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.

Данная серия опытов была проделана с целью изучить влияние непостоянства температуры в помещении интерферометра и влияние теплоты излучения, падающего на интерферометр. При этом использовалось несколько электрических нагревателей, устроенных таким образом, что нагревающая спираль была расположена в фокусе вогнутого зеркала. Непостоянство температуры вызывало медленное, но постепенное смещение системы полос в одну сторону, но не вызывало 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 смещения полос не наблюдалось. Когда же нагреватели были обращены к путям световых лучей, закрытых стеклом, периодический эффект наблюдался, но только тогда, когда стекло было покрыто непрозрачным материалом, и притом весьма несимметричным образом, когда, например, одно плечо было совершенно защищено картоном, а другое не защищено. Эти опыты показали, что при тех условиях, при каких в действительности проводится опыт, периодическое смещение полос не может быть вызвано влиянием температуры.

Лабораторное исследование показало, что эффект "полного периода", упомянутый в предварительном сообщении о наблюдениях на Маунт Вилсон в апреле 1921 г., есть необходимый геометрический результат установки зеркал при получении полос конечной ширины. При низкой температуре, какая была на Маунт Вилсон в апреле 1921 г., необходимо было пользоваться узкими полосами, а в этом случае "эффект полного периода" относительно невелик; по мере увеличения ширины полос этот эффект уменьшается и полностью исчезает лишь

при полосах бесконечной ширины, как это и предполагается в простой теории опыта.

После окончания описанных опытов интерферометр был вновь перенесен на Маунт Вилсон. В 1921 г. аппарат был расположен в глубоком каньоне. Я опасался, что потоки воздуха и несимметричное распределение горных пород в каньоне могут внести нежелательные нарушения. В августе 1924 г. было выбрано новое место на слегка закругленном холме, удаленном от каньонов. Помещение для интерферометра было возведено так, чтобы его ориентировки — направление конька крыши и расположение дверей — составляло 90° с ориентировкой 1921 г. Интерферометр во всех деталях был тот же, что употреблялся в Кливленде в июле 1924 г. В сентябре (4-, 5- и 6-го) 1924 г. было проведено 275 измерений смещения полос, причем измерения были расположены в 10 сериях. Результаты наблюдений обнаружили определенное смещение, в противоположность незначительным результатам, полученным в Кливленде. Соответствующий этому смещению эфирный ветер по скорости и направлению вполне соответствовал впервые наблюдаемому на Маунт Вилсон. Часть наблюдений была проведена при условиях, что пути световых лучей были прикрыты стеклянными ящиками, обложенными гофрированной бумагой, которая, как показали опыты в Кливленде, совершенно исключает влияние теплоты излучения. Однако эти покрывки несколько не изменили результата, откуда следует, что таких влияний вообще нет.

Наблюдения на Маунт Вилсон были возобновлены 27 марта 1925 г. и продолжались до 9 апреля. В этот промежуток времени было сделано 1600 измерений, сведенных в 35 серий. 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 безо всякого влияния на результат.

В течение этого периода условия для наблюдения были исключительно хороши. Некоторое время стоял туман, который поддерживал температуру весьма равномерной. На внешних стеклах домика были повешены четыре точных термометра, 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 посто-

янное смещение полос интерференции, не может изменить периодического смещения ни по величине, ни по направлению.

Наблюдения в апреле 1925 г. дали результаты, совершенно тождественные результатам 1921 г., несмотря на то, что интерферометр был перестроен, 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.

Результаты наблюдений, нанесенные на графики при помощи гармонического анализа (выполненного механическим анализатором), непосредственно давали азимут и скорость эфирного ветра. Никаких поправок в наблюдаемые величины не вносилось; до сих пор все отсчеты (скоростей и азимута - В.А.) эфирного ветра, сделанные на Маунт Вилсон, включались своими полными значениями. Ни одно наблюдение не было опущено, если бы даже оно показалось неудовлетворительным, и никаких "весовых коэффициентов" 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 ни 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 отношение для данной широты между наблюдаемым азимутом эфирного ветра и сидерическим временем наблюдения. Наблюдения в различные времена должны давать один и тот же азимут для данного периода времени. 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 и д-р Штремберг оказали весьма существенную помощь при математическом анализе и развили решения различных частей проблемы по методу наименьших квадратов. Окончательные числовые расчеты требуют нескольких месяцев непрерывной работы и в настоящее время выполняются.

Описанные опыты, выполненные на Маунт Вилсон в течение 1921-1925 гг., приводят к заключению, что существует определенное смещение интерференционных полос, какое было бы вызвано относительным движением Земли и эфира на этой обсерватории со скоростью

приблизительно 10 км/с, т.е. около одной трети орбитальной скорости Земли. При сравнении этого результата с прежними результатами, полученными в Кливленде, напрашивается мысль о частичном увлечении эфира, которое уменьшается с высотой. Думается, что пересмотр кливлендских наблюдений с этой точки зрения должен показать, что они находятся в согласии с подобным предположением и привести к заключению, что опыт Майкельсона – Морли не должен давать нулевого значения в точном смысле слова и, во 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.

Успехи физических наук. 1925. Т.5. С.177-185.

Proc. Nat. Ac. of Washington. 1925. Vol. 11. P.307.