

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКИЗ ТЕКУЩЕЙ ЛИТЕРАТУРЫ**НОВЕЙШИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВЕТА
И МИКРОРАДИОВОЛН В ВАКУУМЕ**

Скорость распространения электромагнитных волн в вакууме является одной из важнейших универсальных констант и возможно точное знание её значения совершенно необходимо для многих отраслей физики.

До последнего времени наиболее достоверным считалось значение, данное Берджем¹ в результате тщательного анализа всех измерений, произведённых до 1941 г.:

$$c = 299\,776 \pm 4 \text{ км/сек.}$$

Это же значение было принято и в более поздних обзорах Дорсея² и Дюмонда и Когена³. Однако за последние годы это значение было подвергнуто сомнению, и в настоящее время имеются убедительные данные, требующие его существенного изменения далеко за пределы вероятной ошибки, указанной Берджем.

Следует сразу же подчеркнуть, что вероятная погрешность, указываемая Берджем, а также всеми исследователями, данные которых он использовал, является продуктом статистической обработки огромного числа отдельных измерений. Возможная же ошибка отдельного измерения во всех без исключения случаях была несравненно выше. Так, в опытах Майкельсона, завершённых после его смерти Пизом и Пирсоном, разброс значений, полученных при усреднении по группам, включающим в себя около 500 отдельных измерений, составлял $\pm 11 \text{ км/сек.}$ в то время как усреднение по группам из шести измерений давало разброс $\pm 93 \text{ км/сек.}$ В частности, три серии измерений, проведённые в декабре 1932 г. и январе—феврале 1933 г., дали следующие значения: $299\,785 \pm 10$, $299\,765 \pm 10$ и $299\,785 \pm 10 \text{ км/сек.}$ Точно так же в измерениях Андерсона разброс средних, взятых по группам, охватывающим до 200 отдельных измерений, достигал $\pm 67 \text{ км/сек.}$

Далее, в ряде опытов не была исключена возможность систематических ошибок. Например, в методике Андерсона⁴, заключающейся в определении относительного смещения по фазе колебаний интенсивности двух модулированных лучей, прошедших различные расстояния, оба световых пучка падали на фотокатод одного фотоэлемента и, путём изменения длины пути одного из лучей, достигалось обращение в нуль фототока, усиливаемого на частоте модуляции. Здесь существенным является предположение, что время пролёта фотоэлектронов от фотокатода до анода одинаково для обоих лучей. Однако неконтролируемые различия в структуре световых пучков и расположении освещаемых ими областей фотокатода могут нарушить это

условие и внести систематическую ошибку в измеряемое значение скорости света. (В описываемых ниже опытах Бергштранда возможность такой ошибки исключается.)

Наконец, следует указать, что почти во всех случаях измерялась непосредственно скорость распространения электромагнитных волн видимого диапазона. Исключение представляют опыты Роза и Дорсея (отношение эл.-стат. ед. к эл.-магн. ед.) и Мерсье (стоячие волны Герца), причём точность последних была невелика.

Измерения скорости распространения электромагнитных волн радиодиапазона не представляют с этой точки зрения интереса, ибо включают неучитываемое (и весьма существенное) влияние земной поверхности. В микроволновом диапазоне, напротив, влияние это пренебрежимо мало и скорость распространения, так же как и для света, зависит исключительно от показателя преломления среды. Вместе с тем для целей радиолокации (в том числе радиогодезии) необходимо знание скорости распространения микроволн с возможно высокой точностью. На этом пути и возникли первые сомнения в справедливости значения, данного Берджем.

Сопоставление данных радиогодезических измерений, приведённых по так называемой системе «Гобой» [см., например, 5)], с данными триангуляционных измерений (точность которых достаточно высока) привело к заключению^{6,7}, что существует систематическая ошибка, которая в значительной мере устраняется, если предположить, что скорость распространения микроволн в вакууме равна

$$c = 299\,788 \text{ км/сек.}$$

Однако такое предположение устраняло расхождения не полностью, и авторы интерпретировали свои результаты как определение скорости распространения микроволн в различных условиях.

Аналогичное сопоставление триангуляционных измерений с радиогодезическими (с системой «Шоран») было проведено Аслаксоном⁸. Метод радиолокационных измерений состоял в аналитическом определении минимума суммы расстояний от двух наземных станций до самолёта, летевшего между ними. Всего было промерено 47 линий протяжённостью примерно от 100 до 550 км. Для расчёта расстояний использовалось значение скорости распространения электромагнитных волн в вакууме, данное Берджем. При этом обнаружилось систематическое расхождение в расстояниях, тщательный анализ которого привёл к выводу, что ошибка может корениться только в неточном знании либо скорости распространения микроволн в вакууме, либо показателя преломления воздуха. Предполагая первое, автор искал поправку к значению Берджа согласно формуле:

$$\Delta c = \frac{\Delta l}{l} c_1,$$

где l — расстояние, определённое радиолокационным методом, Δl — разность геодезического и радиогодезического расстояний и c_1 — скорость света в вакууме согласно Берджу. Исправленное таким путём значение скорости микроволн в вакууме оказалось равным

$$c = 299\,792,3 \pm 2,4 \text{ км/сек.}$$

Отклонения отдельных значений от среднего колебались от 0,2 до 3,6 км/сек, за исключением самой короткой дистанции, где оно достигало 8,4 км/сек. Если отбросить это наименее достоверное значение, то вероятная ошибка составляет всего ± 1 км/сек. К тому же результату привёл и другой метод обработки результатов измерений, на котором мы останавливаться не станем. Среднее отклонение от

вероятнейшего значения для различных измерений длины одной и той же дистанции, проводившихся в один и тот же или различные дни, составляло около 2 м.

Развитие микроволновой техники создало и другую возможность определения скорости света в вакууме, реализованную Эссеном и Гордон-Смайсом^{9, 10}.

Известно, что затухание микроволн, распространяющихся вдоль полной металлической трубы соответствующих размеров, очень мало и что закрытый длинный волновод является резонатором с ничтожно малым затуханием. Если резонатор выполнен в форме полого прямого кругового цилиндра, то резонансная частота определяется выражением

$$f_{\text{рез}} = v \sqrt{\left(\frac{r}{\pi D}\right)^2 + \left(\frac{n}{2L}\right)^2} \left(1 - \frac{1}{2Q}\right),$$

где v — скорость распространения микроволн в среде, заполняющей резонатор, D и L — диаметр и длина полости, r — постоянная, характерная для волн данного типа (значение её находится расчётом), n — число полуволн, укладывающееся в длину резонатора, и Q — добротность резонатора. Таким образом, измерения $f_{\text{рез}}$, D , L и Q , которые могут быть осуществлены с весьма высокой точностью, позволяют найти значение скорости распространения микроволн в среде, заполняющей резонатор. В описываемых опытах воздух из полости резонатора удалялся и, таким образом, непосредственно определялась скорость света в вакууме. Это освобождало результат от дополнительных погрешностей, вносимых обычно неточностью значения показателя преломления воздуха.

Резонатор представлял собой медный цилиндр с внутренним диаметром около 7,4 см и длиной 8,5 см. Специальные измерения показали, что влияние вводов и соединительных устройств пренебрежимо мало. Измерения велись с волнами типа E_{010} и E_{011} , для которых условия опыта были наиболее благоприятны.

Первоначальное значение, полученное для скорости распространения, составляло⁹:

$$c = 299\,793 \pm 9 \text{ км/сек.}$$

Более поздние измерения, детали которых пока не опубликованы¹⁰, улучшили это значение:

$$c = 299\,792,5 \pm 3 \text{ км/сек.}$$

Эссен указывает, что при этом были вскрыты небольшие систематические расхождения между измерениями, производившимися в различных условиях, и полагает, что они вызваны механическими или электрическими дефектами стенок резонатора.

Особо Эссен подчёркивает тот факт, что методика проведенных им измерений принципиально отлична от остальных и что возможные ошибки обуславливаются в этом случае иными факторами, подающимися как экспериментальному, так и теоретическому учёту. Вместе с тем он подчёркивает, что в отличие от остальных измерений здесь имеется возможность оценить не только вероятную, но и предельную абсолютную погрешность измерений; значение последней им и указывается.

Остановимся в заключение на измерениях скорости света, осуществлённых Бергштрандом^{11, 12, 13}. Измерения эти примечательны, преж-

де всего, тем, что, применяя обычную оптическую методику, автор примерно на два порядка повысил точность измерений, сузив границы погрешности до нескольких сот метров в секунду.

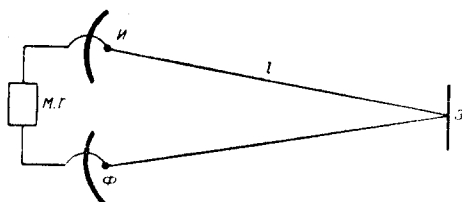


Рис. 1. Принципиальная схема опыта Бергштранда.

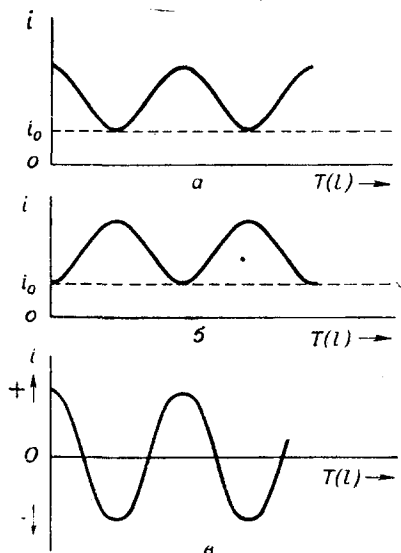


Рис. 2. Зависимость интенсивности измеряемого фототока от времени T распространения света до зеркала и обратно: а) фазы модуляции светового пучка и чувствительности фотозлемента совпадают; б) сдвиг фаз равен 180° ; в) фаза модуляции периодически опрокидывается.

точность определения T оказывается невысокой. Для повышения точности Бергштранд применил нулевой метод, использовав следующий остроумный приём.

Если интенсивность светового пучка и чувствительность фотозлемента модулируются не в фазе, а в противофазе, то кривая зависимости измеряемого тока i от расстояния до зеркала примет вид,

погрешности до нескольких сот метров в секунду.

Метод, применённый Бергштрандом, по существу идентичен методу, использованному (ровно столетием ранее) Физо. Но по своему техническому осуществлению он ближе к методике Андерсона⁴, будучи лишён, однако, недостатков последней. Общая схема опыта ясна из рис. 1.

Интенсивность светового потока, посылаемого источником И (30-ваттная лампочка накаливания), модулируется с частотой $8,3 \text{ Мгц}$ с помощью ячейки Керра, питаемой генератором М. Г., стабилизированным кварцем. С той же частотой и в той же фазе (от того же генератора) изменяется чувствительность фотозлемента Φ , на который падает свет, отразившийся от плоского зеркала З, отстоящего на большом расстоянии l .

Очевидно, между колебаниями интенсивности светового пучка, попадающего на фотозлемент, и колебаниями чувствительности фотозлемента будет существовать сдвиг фаз, зависящий от времени T , затрачиваемого светом на прохождение пути $2l$ до зеркала и обратно.

Следовательно, если измерять фототок достаточно инерционным прибором, усредняющим значение фототока за много периодов модуляции, то зависимость измеряемой силы тока i от T , а тем самым и от расстояния l до зеркала, будет иметь вид, показанный на рис. 2, а.

Таким образом, по величине измеряемой силы тока i можно судить о времени T . Однако

представленный на рис. 2, б. Допустим теперь, что сдвиг фазы периодически меняется на 180° и одновременно меняется направление фототока в воспринимающем его приборе. Тогда, если опрокидывание фазы происходит достаточно часто и прибор достаточно инерционен, то зависимость показаний прибора от I будет иметь вид, показанный на рис. 2, в. Нетрудно видеть, что кривая строго симметрична относи-

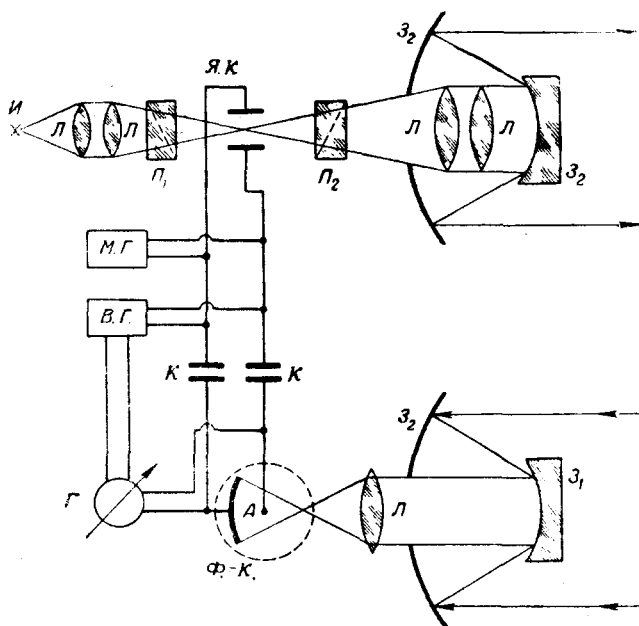


Рис. 3. Скелетная схема приёмного и модулирующего устройств в опытах Бергштранда:

И — источник света, *Я. К.* — ячейка Керра, *П1* и *П2* — поляризационные призмы (скрещённые), *М. Г.* — модулирующий генератор, *В. Г.* — вспомогательный генератор, опрокидывающий фазу, *Г* — гальванометр, *Ф.К.* — фотокадод, *А* — анод фотоэлемента, *К* — конденсаторы, *Л* — линзы, *З1* и *З2* — зеркала (диаметр зеркал $З_2$ равен 45 см).

тельно нуля прибора и положение нуля может быть фиксировано с большой точностью. Практически опрокидывание фазы модуляции интенсивности светового пучка осуществлялось (сто раз в секунду), вспомогательным генератором *В. Г.* (рис. 3). Одновременно, тем же вспомогательным генератором *В. Г.* с помощью ламповой схемы, производилось коммутирование направления фототока в гальванометре *Г*.

На рис. 3. приведена скелетная схема приёмного и модулирующего устройств.

Положения зеркала, отвечающие обращению в нуль измеряемого тока i , определяются соотношением

$$l_N = k + \frac{2N-1}{8} \lambda,$$

где k — аппаратурная постоянная, определяемая экспериментально, N — целое число, значение которого может быть найдено из грубых определений положения зеркала, и λ — длина волны, соответствующая частоте модуляции. В условиях опыта $\lambda \cong 36$ м и расстояние между двумя положениями зеркала, соответствующими нулевым отсчётам по гальванометру, составляло около 9 м. Значения l_N постоянны в той же мере, что и частота модуляции (т. е. $\sim 1 \cdot 10^{-7}$), но зависят от атмосферных условий. При $l=10$ км эта зависимость выражается примерно следующими величинами: 0,9 см на 1°C и 0,4 см на 1 мм давления.

В полевых условиях установка зеркала в положение, точно соответствующее $i=0$, весьма затруднительна, и выполнение этого условия достигалось путём небольшого, строго контролируемого изменения частоты.

При расстоянии до зеркала $l=9$ км средняя ошибка из шести измерений, выполняемых в течение $1/4$ часа, составляла 0,4 см, а отклонение от среднего для различных дней не превышало 3 см.

В первоначальных измерениях ^{11, 12} для скорости света в вакууме было получено:

$$c = 299\,796 \pm 2 \text{ км/сек.}$$

Однако позднее ¹³ автором была обнаружена аппаратурная ошибка и это значение исправлено на

$$c = 299\,793 \pm 2 \text{ км/сек.}$$

Измерения 1949 г. [были проведены с улучшенной аппаратурой и дали значение

$$c = 299\,792,7 \pm 0,25 \text{ км/сек.}$$

Отклонения отдельных результатов измерений от среднего не превышают 1,1 км/сек. Пределы погрешности в определении l , возникающей вследствие не поддающейся учёту неопределённости в оценке различных факторов, характеризуются следующими цифрами: атмосферные условия — 0,20 см, частота модуляции — 0,25 см, цвет излучения — 0,20 см, длина базисной линии — 0,25 см (при длине базиса 7 км; при коротких базисах погрешность может возрасти до 1 см). Автор предполагает продолжить измерения на увеличенных дистанциях.

Таким образом, измерения последних лет, проведённые тремя различными методами, согласно приводят к значению, найденному Бергштрандом. Это значение на 16 км/сек превышает значение Берджа и лежит далеко за пределами указанной им вероятной погрешности. При этом, в отличие от данных, использованных Берджем, для измерений последних лет характерен крайне малый разброс результатов отдельных измерений и незначительная вероятная погрешность при сравнительно бедной статистике. Всё это убедительно свидетельствует в пользу нового значения скорости света в вакууме. Сопоставление значений, полученных после 1905 г., приводится в таблице и на рис. 4.

Результаты измерений скорости света в вакууме, выполненных после 1905 г.

Год	Автор	Метод	Дистанция (в метрах)	Скорость света в вакууме (км/см)
1906	Роза и Дорсей (исправлено Берджем в 1934 г.)	Отношение эл.-стат. ед. к эл.-магн. ед.	—	$299\,781 \pm 10$
1923	Мерсье	Стоячие волны Герца	—	782 ± 30
1924	Майкельсон	Вращающееся зеркало	35 тыс.	802 ± 30
1926	Майкельсон	Вращающееся зеркало	35 тыс.	796 ± 4
1929	Коромос и Миттельштедт	Ячейка Керра, фото-элемент	250	778 ± 20
1932/33	Майкельсон, Пиз и Пирсон	Вращающееся зеркало в вакууме	15 тыс.	774 ± 11
1937	Андерсон	Ячейка Керра, фото-элемент	170	771 ± 14
1940	Хюттель	Ячейка Керра, фото-элемент	80	768 ± 10
1941	Андерсон	Ячейка Керра, фото-элемент	170	776 ± 14
1948	Джонс и Корнфорд	Радиолокация (Гобой)	—	$788 \pm ?$
1948	Эссен и Гордон-Смайс	Полый резонатор в вакууме	—	793 ± 9
1949	Бергштранд (исправлено в 1950 г.)	Ячейка Керра, фото-элемент	9 тыс.	793 ± 2
1949	Аслаксон	Радиолокация (Шоран)	100—550 тыс.	$792 \pm 2,4$
1950	Эссен	Полый резонатор в вакууме	—	$792,5 \pm 3$
1950	Бергштранд	Ячейка Керра, фото-элемент	1,7—6,9 тыс.	$792,7 \pm 0,25$

Для более ранних измерений, имеющих ныне лишь исторический интерес, характерны существенно большие значения скорости света и несравненно большие погрешности.

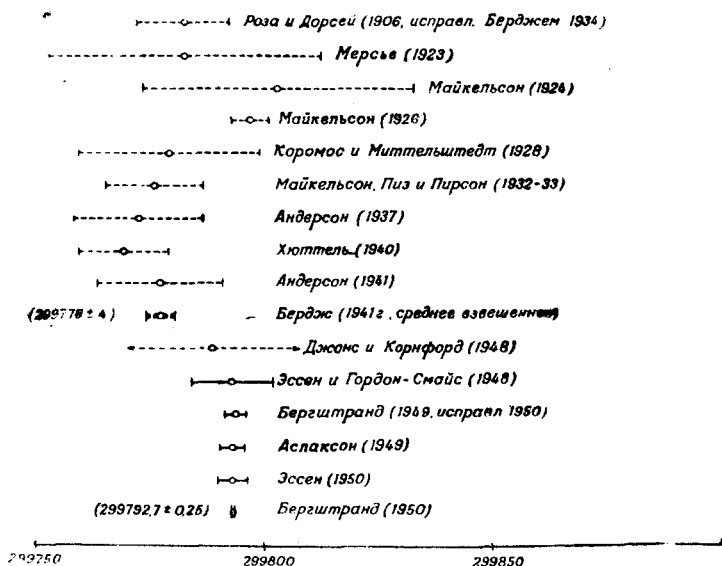


Рис. 4. Сопоставление результатов измерений скорости света в вакууме, выполненных после 1905 г. (Пунктиром показана вероятная ошибка, сплошной линией—наибольшая возможная.)

Г. Розенберг

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Birg, Physics 8, 90 (1941).
2. Dorsey, Trans. Amer. Phys. Soc. 5, 34, часть I, 109 (1944).
3. Du Mond and Cohen, Rev. Mod. Phys. 20, 82 (1948).
4. Anderson, J. Opt. Soc. Amer. 31, 187 (1941).
5. Н. Н. Малов, УФН 29, 1 (1936).
6. Jones and Cornford, J. Inst. Electr. Eng. 95, часть II (1948).
7. Jones and Cornford, J. Inst. Electr. Eng. 96, часть III, 447 (1949).
8. Aslakson, Nature 164, 711 (1949).
9. Essen and Gordon-Smith, Proc. Roy. Soc. Lond. A194, 348 (1948).
10. Essen, Nature 165, 582 (1950).
11. Bergstrand, Nature 163, 339 (1949).
12. Bergstrand, Arkiv Matem. Astron. och Fysik 36A, 20 (1949).
13. Bergstrand, Nature 165, 405 (1950).