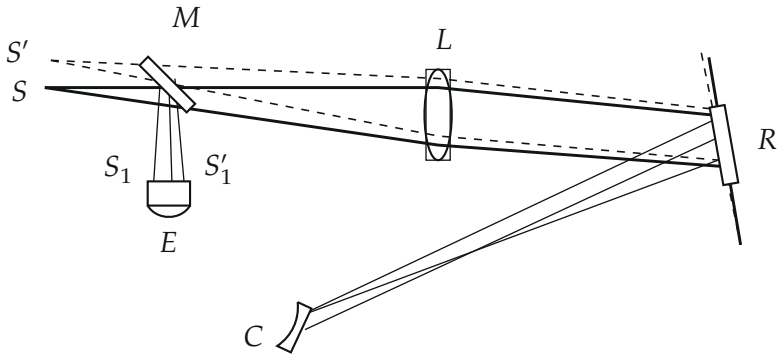
Опыт Фуко

Задача 5. [Курчатов 2025/26, 10 класс, задача 5] На рисунке ниже показана установка, использованная Жаном Бернаром Фуко (1819–1868) для измерения скорости света. На схеме E — окулярный микрометр, M — неподвижное плоское зеркало, L — собирающая линза. R — вращающееся плоское зеркало. Зеркало C, на поверхности которого формируется промежуточное действительное изображение источника, закреплено на дуге окружности радиуса a. Центр этой окружности лежит на оси вращения быстровращающегося плоского зеркала R, ось вращения которого перпендикулярна плоскости рисунка. Зеркало R вращается по часовой стрелке с угловой скоростью ω. Расстояние от мнимого источника S до линзы равно l, расстояние от линзы до оси вращения зеркала равно b. Свет, испущенный из точки S_1, после прохождения через систему вновь даёт изображение в точке S_1'; измеренное расстояние между этими точками равно y. Найдите скорость света c.



▲ **Решение.** **Что происходит.** Это задача геометрической оптики на изображение в плоском зеркале и в линзе. Линза L строит изображение источника на зеркале C (путь идёт через зеркало R); зеркало C возвращает свет назад тем же путём, и без вращения изображение вернулось бы в точку источника. Пока свет идёт от R до C и обратно, зеркало R успевает повернуться на малый угол, отражённый пучок поворачивается на удвоенный угол, и изображение в окуляре сдвигается. Сдвиг пропорционален времени полёта света, то есть $1/c$, — его и измеряют.

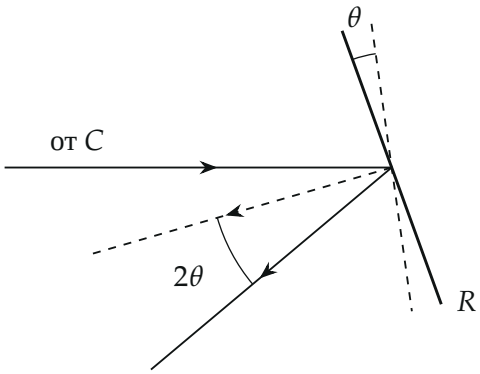
Обозначения. t — время полёта света от R до C и обратно; θ — угол поворота зеркала R за это время; S'' — изображение источника на зеркале C; Y — сдвиг изображения точки S'', видимого в зеркале R; Г — увеличение, с которым линза переносит этот сдвиг к источнику.

1. Время полёта и поворот зеркала. Зеркало C стоит на дуге радиуса a с центром на оси R, поэтому путь туда и обратно равен $2a$ при любом положении C на дуге:

$$t = \frac{2a}{c}, \qquad \theta = \omega t = \frac{2a\omega}{c}.$$

Угол θ мал: при $a \sim 20$ м и $\omega \sim 5000$ рад/с он порядка 10^{-3} рад, поэтому дальше пользуемся тем, что длина малой дуги равна хорде.

2. Поворот отражённого луча. Закон отражения: угол отражения равен углу падения, оба отсчитаны от нормали. Если зеркало поворачивается на θ, нормаль поворачивается на θ, угол падения меняется на θ, и отражённый луч поворачивается на 2θ (рисунок 2).

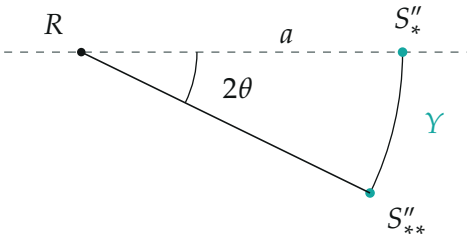


Луч, вернувшийся от зеркала C, отражается от зеркала R. Сплошное зеркало и сплошной отражённый луч — положение, при котором свет ушёл к C; штриховые — зеркало, повернувшееся на θ к возвращению света, и отражённый луч, повернувшийся на 2θ.

3. Сдвиг изображения за зеркалом R. На обратном пути точка S'' на зеркале C — источник для зеркала R. Её изображение в плоском зеркале лежит симметрично относительно плоскости зеркала, на расстоянии a

за осью R. При повороте зеркала на θ это изображение поворачивается вокруг оси на 2θ (тот же закон, что для лучей в шаге 2) и смещается по дуге радиуса a:

$$Y = a \cdot 2\theta = \frac{4a^2\omega}{c}.$$

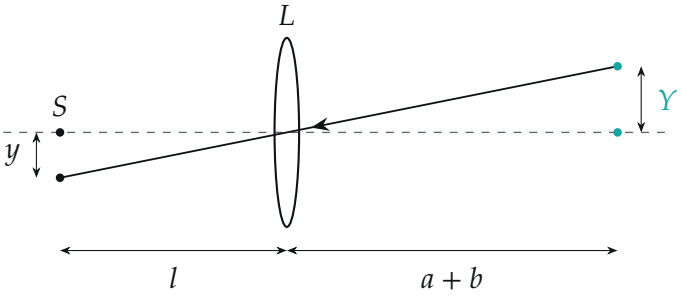


Изображение точки S'' в зеркале R лежит на расстоянии a от оси вращения: S''_* — до поворота зеркала, S''_{**} — после поворота на θ. Изображение повернулось на 2θ и сместилось на $Y = 2a\theta$ (угол на рисунке сильно увеличен).

4. Перенос сдвига линзой. Для линзы L на обратном пути предмет — изображение S''_* (или S''_{**}), оно находится на расстоянии $a + b$ от линзы: b от линзы до оси R и ещё a за осью. Прямой путь света сопряжён с обратным: линза строила изображение источника S (расстояние l) в точке на расстоянии $a + b$, значит теперь она строит изображение точки на расстоянии $a + b$ обратно на расстоянии l. Луч через оптический центр линзы не преломляется, поэтому из подобия треугольников (рисунок 4) поперечное увеличение

$$\Gamma = \frac{l}{a+b}, \qquad y = \Gamma Y = \frac{l}{a+b} \cdot \frac{4a^2\omega}{c}.$$

Плоское зеркало M только переносит изображение из S в окуляр, расстояний не меняя, поэтому смещение между S_1 и S'_1 равно y.



Обратный путь света, развёрнутый в прямую (зеркало R убрано, вместо S'' — его изображения в R на расстоянии $a+b$ от линзы). Луч через центр линзы связывает сдвиг Y предмета и сдвиг y изображения: $y/Y = l/(a+b)$.

5. Скорость света. Выразим c:

$$c = \frac{4a^2 l\,\omega}{y\,(a+b)}.$$

Обратите внимание. Отражённый луч поворачивается на 2θ, а не на θ, — потеря двойки занижает c вдвое. Увеличение считается для обратного хода света: предмет — изображение S'' в зеркале R, он на a дальше оси, поэтому в знаменателе $a+b$, а не b.

Проверка. Размерность: $\dfrac{\text{м}^2\cdot\text{м}\cdot\text{с}^{-1}}{\text{м}\cdot\text{м}} = \text{м/с}$. Предел: при $\omega\to 0$ сдвиг $y\to 0$ и изображение возвращается в источник; при бесконечной скорости света сдвиг тоже нулевой — в ответе $y\propto\omega/c$. Оценка с данными опыта Фуко ($a=20$ м, $l\approx b\approx 1$ м, $\omega = 2\pi\cdot 800$ рад/с, $c = 3\cdot 10^8$ м/с): $y = \dfrac{4\cdot 400\cdot 1\cdot 5027}{3\cdot 10^8\cdot 21}\approx 1{,}3$ мм — величина, которую измеряет окулярный микрометр.

Смысл: вращающееся зеркало превращает очень малое время полёта света в измеримый сдвиг изображения, а длинное плечо a входит в квадрате.

Ответ. $c = \dfrac{4a^2 l\,\omega}{y\,(a+b)}$.