

Road to IPhO

Отражение света от движущегося зеркала (4.5 балла)

Отражение света от движущегося зеркала

Отражение света от зеркала, движущегося с релятивистской скоростью, представляет собой давно известную теоретическую задачу. Эйнштейн предложил решение, использующее преобразования Лоренца для зеркала, движущегося со скоростью v . Однако та же формула может быть получена более простым способом. Рассмотрим в лабораторной системе отсчета процесс отражения света (см. рис. 1) от плоского зеркала M , движущегося со скоростью $\vec{v} = v\vec{e}_x$ (где \vec{e}_x — единичный вектор в направлении оси x). Скорость составляет угол φ с плоскостью зеркала ($\varphi \leq 90^\circ$, рис. 1). Луч света падает на зеркало под углом α и отражается под углом β , углы падения и отражения отсчитываются от вектора нормали к плоскости зеркала n до падающего луча l и отражённого луча l' соответственно.

Можно показать, что справедливо соотношение

$$\sin \alpha - \sin \beta = \frac{v}{c} \sin \varphi \sin (\alpha + \beta) \quad (1)$$

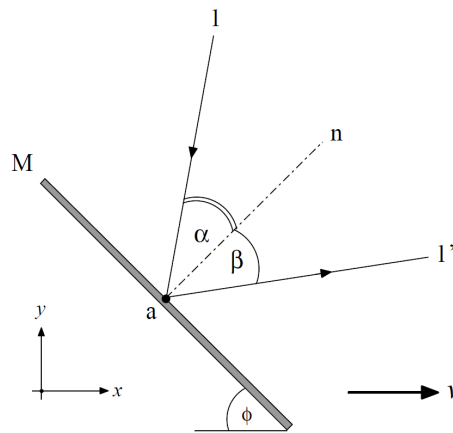


Рис. 1: Отражение света движущимся зеркалом

Часть А. Зеркало Эйнштейна

Около века назад Эйнштейн вывел закон отражения электромагнитной волны от зеркала, движущегося с постоянной скоростью $\vec{v} = -v\vec{e}_x$ (рис. 2). Применив преобразования Лоренца к результату, полученному в системе отсчёта, связанной с зеркалом, Эйнштейн нашёл, что

$$\cos \beta = \frac{\left(1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) \cos \alpha - 2\frac{v}{c}}{1 - 2\frac{v}{c} \cos \alpha + \left(\frac{v}{c}\right)^2} \quad (2)$$

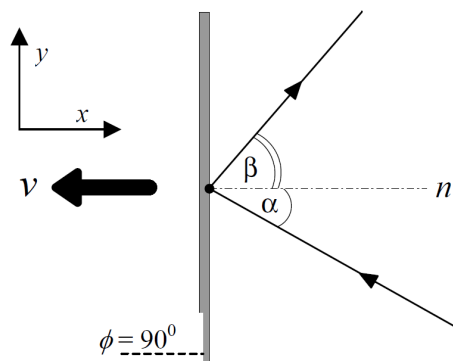


Рис. 2: Зеркало Эйнштейна, движущееся влево со скоростью v

Road to IPhO

A1 Выведите эту формулу, используя уравнение (1) и не используя преобразования Лоренца.

1.5

Часть В. Сдвиг частоты

B1 Пусть в ситуации, описанной в части А, на зеркало М падает монохроматический свет частоты f . Найдите частоту отражённого света f' . Найдите Δf в процентах от f в случае $\alpha = 30^\circ$ и $v = 0.6c$ (рис. 2).

Часть С. Уравнение для движущегося зеркала

На рис. 3 показаны положения зеркала в моменты времени t_0 и t . Так как наблюдатель движется влево, то зеркало относительно него движется вправо. Луч света 1 падает в точку a в момент времени t_0 и отражается как луч $1'$. Луч 2 падает в точку d в момент времени t и отражается как луч $2'$. Таким образом ab — волновой фронт падающей волны в момент времени t_0 . Атомы зеркала в каждой точке возбуждаются падающим светом и начинают излучать световые волны. Возбуждение, вызванное участком ab волнового фронта прекращается в момент времени t , когда волновой фронт падающей волны проходит точку d .

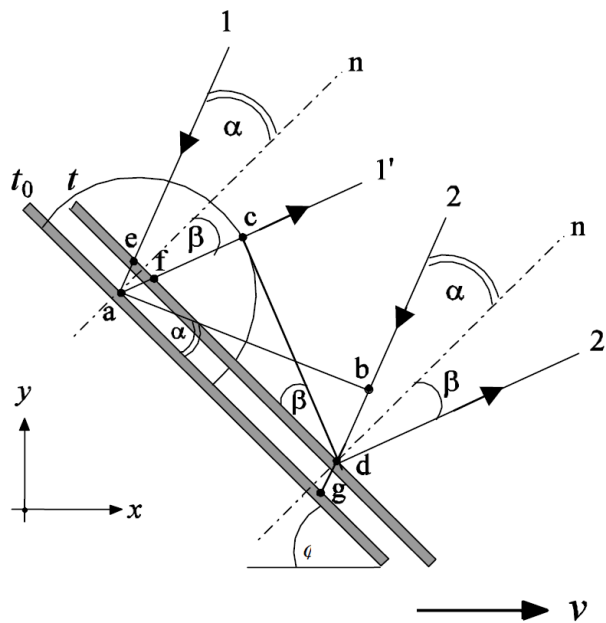


Рис. 3

C1 Используя рис. 3 как схему распространения световой волны или любые другие методы, выведите уравнение (1).

2.0