

Капли дождя на стёклах и абберация света



Проводится сопоставление явлений абберации света (различие направлений света в разных системах отсчёта): параллакса, звёздной абберации и годовой абберации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: эффект Доплера, абберация света, параллакс, звёздная абберация, годовая абберация

А.Б. РЫБАКОВ
 al-rybakov@mail.ru,
 ГБОУ лицей № 144,
 г. Санкт-Петербург

Мы часто не отдаём себе отчёта, что идеи совсем простых задач из школьного задачника когда-то были предметом серьёзного научного открытия. Например, так произошло с эффектом Доплера и с родственным ему явлением – с абберацией.

Сначала – о термине. Латинское слово *aberratio* означает *отклонение, уклонение, смещение*. Термин «абберация» входит в состав разных составных терминов в разных науках. В школьном курсе упоминается «абберация оптических систем» – это разного рода дефекты таких систем. Мы же будем говорить об абберации света (иногда говорят *астрономическая абберация* или *звёздная абберация*, поскольку именно в звёздной астрономии эффект играет наибольшую роль и именно в этой области он и был открыт).

Теперь о сути дела. Известная всем формулировка постулата специальной теории относительности об одинаковости скорости света в разных инерциальных системах отсчёта (СО), возможно, вуалирует в сознании учеников тот факт, что другие-то характеристики световой волны в разных СО, вообще говоря, различаются.

Различие частоты волны (в частности, световой) в разных СО – это **эффект Доплера**. Различие направлений света в разных СО – это **абберация**.

Начнём со школьной задачи, с анализа совсем простой ситуации. Пусть мы едем в вагоне поезда, а за окном идёт дождь. Пусть капли дождя падают по вертикали со скоростью u , а поезд идёт со скоростью v . По правилу сложения скоростей, скорость капли в СО «вагон» $\vec{w} = \vec{u} - \vec{v}$, то есть наклонена к вертикали под углом α , таким, что $\operatorname{tg} \alpha = v/u$. Именно так будут наклонены и следы от капель на оконном стекле (см. отрезок CD на рис. 1). Но капли воды на оконном стекле, строго говоря, нельзя считать движущимися совсем свободно, и потому иногда авторы задачника обыгрывают этот сюжет несколько ина-

че: на платформе того же поезда располагают узкий полый цилиндр так, чтобы капли дождя пролетали сквозь него, не касаясь стенок. Мы, конечно, уже понимаем, что цилиндр надо наклонить от вертикали в направлении движения на тот же угол α .

Теперь пусть наш поезд идёт назад с прежней скоростью v . Наши рассуждения будут особенно наглядны, если мы представим, что состав не разворачивался (а тепловоз, что тащит состав, после каких-то маневров подсоединили к составу с другой стороны). Теперь цилиндр надо наклонить в другую сторону (см. отрезок CB на рис. 1). Заметьте, что оба раза мы наблюдаем траектории капель в одной системе отсчёта, жёстко связанной с вагоном. Возникший у нас треугольник полностью повторяет рисунок из оригинальной статьи 1728 г., в которой было впервые описано это явление – абберация света звёзд.

Расскажем совсем кратко о том, как это произошло. Фамилию английского астронома, открывшего это явление, *James Bradley*, по-русски передают и как Брадлэй, и как Брэдли, и как Брэдли. Мы выберем третий вариант. Речь идёт о 20-х гг. XVIII в. Идеи Коперника если и не победили окончательно, то распространились уже весьма широко. Один из доводов против движения планет вокруг Солнца (известный, впрочем, уже и древним грекам) – отсутствие параллакса. Ведь если Земля вращается вокруг Солнца, то ближайšie к нам звёзды должны при движении Земли по орбите менять своё положение на фоне более далёких «неподвижных» звёзд – но это явление не наблюдалось.

Брэдли намеревался в течение целого года измерять координаты выбранной звезды. Точность своих измерений координат он оценивал как $0,5''$. Он надеялся, что такой точности хватит для обнаружения параллакса (напомним, что расстояния до звёзд в то время не были известны).

В чём же сложность таких наблюдений? В том, что надо было и через неделю, и через месяц, и через год устанавливать телескоп точно в одном и том же положении (а дело-то происходит на вращающейся Земле). И Брэдли это удалось.

Но обнаружил Брэдли в своих наблюдениях 1725–28 гг. такие изменения координат выбранной звезды, которые невозможно было объяснить параллаксом, – так была открыта абберация (детали рассуждений и наблюдений

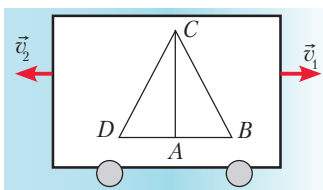


Рис. 1

Брэдли читатель может найти, например, в [1, 2], мы на этом останавливаться не будем).

Брэдли очень удачно выбрал звезду – как сказал бы астроном, около полюса эклиптики. То есть направление полёта квантов света от звезды (по Брэдли, «световых корпускул») в течение всего года было практически перпендикулярно к вектору скорости Земли. В этом случае анализ аберрации на основе корпускулярной теории света полностью совпадает с анализом движения дождевой капли (см. выше). Потому-то рисунок в статье Брэдли полностью совпадал с нашим (см. с. 52).

Оценим угол, на который надо отклонить телескоп от истинного направления на звезду (его называют *углом аберрации*). Как мы уже знаем, $\operatorname{tg} \alpha = v/c$. Скорость Земли при движении по орбите $v \approx 30$ км/с. Скорость света $c \approx 3 \cdot 10^5$ км/с, так что для угла аберрации имеем: $\operatorname{tg} \alpha \approx 10^{-4}$. Заменяя тангенс угла самим углом и переводя радианы в угловые секунды, получаем $\alpha \approx 20''$.

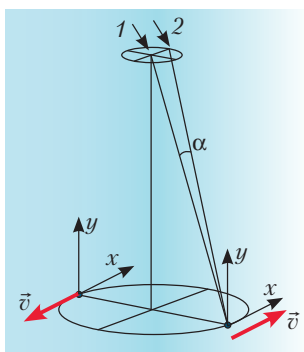


Рис. 2

Вот Брэдли и обнаружил, что за год видимое положение звезды описывает на небесной сфере окружность диаметром около $40''$: точка 1 – это истинное положение звезды, точка 2 – видимое её положение с Земли через полгода.

Заметим, что свой телескоп Брэдли не наклонял, а, наоборот, жёстко закрепил в стенах лаборатории – соответствующие углы были столь мала, что звезда не выходила из поля зрения телескопа.

Историческое значение открытия Брэдли не только в наблюдении окружности, которую описывает видимое положение звезды (строго говоря, эллипс) на небесной сфере. Если бы Земля двигалась прямолинейно и равномерно, обнаружить бы аберрацию было невозможно, тогда бы видимые положения всех звёзд просто сдвигались относительно истинных – но мы об этом и не узнали бы. Так что открытое Брэдли движение видимого положения звезды свидетельствует о движении Земли вокруг Солнца.

Более того, из своих измерений Брэдли смог рассчитать, за какое время свет преодолевает расстояние от Земли до Солнца. Полученное им время очень близко к современному значению. Так что фактически Брэдли измерил и скорость света (вторым после О. Рёмера).

Теперь вспомним снова о параллаксе. Абберрация и параллакс, можно сказать, родственные явления. Оба – чисто кинематические эффекты, оба проявляются при наблюдении звёзд. И проявления их похожи: оба приводят к тому, что видимое положение звезды за год описывает на небесной сфере эллипсы, два разных эллипса.

Обнаружить параллакс, как мы уже знаем, Брэдли не удалось (для выбранной звезды сдвиг, обусловленный параллаксом, меньше точности его измерений). Он был обнаружен только в первой половине XIX в. (первым результаты опубликовал русский астроном В.Я. Струве).

Возникновение параллакса поясняет рис. 3. При положении Земли в точке A на орбите звезда проецируется в точку A' на небесной сфере. При движении Земли по орбите видимое положение звезды описывает эллипс на небесной сфере. Угол, под которым был бы виден со звезды средний радиус земной орбиты (при условии, что направление на звезду перпендикулярно радиусу) называется *углом параллакса* или просто *параллаксом* данной звезды. Поскольку он всегда очень мал, то можно записать: $\beta = R/L$.

Измерение параллакса является основным методом определения расстояния до ближайших звёзд. Самый большой параллакс – у ближайшей к нам звезды, α Центавра: 0,762. Как уже должно быть ясно, размеры абберационного эллипса определяются скоростью движения Земли по орбите и, следовательно, одинаковы для всех звёзд, размеры же параллактического эллипса всегда во много раз меньше и определяются расстоянием до звезды.

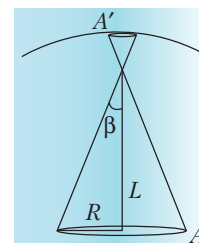


Рис. 3

Заметим ещё, что сдвиг видимого положения звезды, обусловленный абберрацией, происходит в направлении вектора скорости Земли на орбите, а из-за параллакса звезда сдвигается в точку, противоположную положению Земли.

Абберрация, обусловленная движением Земли вокруг Солнца, в астрономии называется, по понятным причинам, *годовой абберрацией*. Можно говорить также о *суточной абберрации* (обусловленной вращением Земли вокруг своей оси) и о *вековой* (обусловленной движением Солнечной системы вокруг центра Галактики). То же можно сказать и о параллаксе. Но не будем превращать эти заметки в учебник астрономии.

В школьном курсе кинематика выглядит не слишком интересным, вспомогательным разделом, предваряющим «настоящую» физику. А это совсем не так. Эффект Доплера, абберрация света, параллакс в звёздной астрономии, конус Маха и излучение Вавилова–Черенкова – интереснейшие и неожиданные эффекты при наблюдении быстро движущихся тел, и это всё кинематика.

Нет неинтересных тем – есть только нехватка времени в школьном курсе.

Литература

1. Филонович С.Р. Самая большая скорость. М.: Наука, 1983.
2. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика // Берклеевский курс физики. Т. 1. М.: Наука, 1975.