Распространение сигнала от движущегося источника, или Что увидит наблюдатель

А.РЫБАКОВ

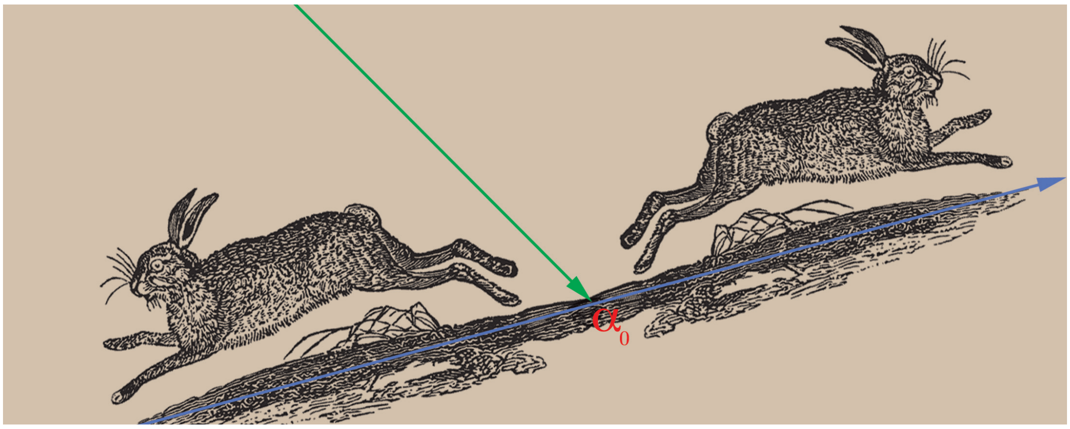
Каким образом мы получаем информацию о движении разных объектов? Есть два принципиально различных способа наблюдений.

Во-первых, можно вдоль траектории объекта расставить датчики, фиксирующие момент прохождения объекта (при необходимости – «головы» и «хвоста» объекта). Если приводить примеры «из жизни», то, по-видимому, именно так обстоит дело на железной дороге. Сигналы от всех датчиков поступают к какому-то оператору, который и восстанавливает картину движения. Движение объекта, как оно предстает перед нами при таком способе наблюдения, можно было бы назвать «истинным», «действительным» или «реальным». Скорость объекта, измеренную в этом случае, мы будем обозначать буквой v.

Во-вторых, можно получать какие-то сигналы, приходящие от самого объекта, и по ним судить о движении объекта. Любой сигнал распространяется не мгновенно. Пока сигнал от движущегося объекта дойдет до наблюдателя, объект уже окажется в другом месте. И получаемая таким образом картина движения может заметно отличаться от истинной. Конечно, этот эффект будет существенен, если скорость объекта составляет заметную часть скорости сигнала или превосходит ее. Так, слыша звук самолета, летящего за облаками, мы понимаем, что самолет находится совсем не в той точке, на которую нам указывают слуховые ощущения. Понятно также, что, например, в случае космических объектов наблюдатель может видеть движение объекта, который миллионы лет назад прекратил свое существование. При таком способе получения информации следует говорить о «видимом» движении «мнимого» объекта, которое зафиксирует наблюдатель. Скорость «видимого» движения будем обозначать буквой v'.

Установившейся общепринятой терминологии в этом вопросе, по-видимому, не существует, мы будем использовать приведенные здесь, возможно несколько неуклюжие, термины, опуская кавычки.

Итак, герои нашего рассказа – это движущийся объект (источник каких-то сигналов), испускаемые им сигналы и наблюдатель. Мы будем для краткости говорить «наблюдатель», не предполагая, что речь идет именно о человеке, полагающемся на свои органы чувств. Это может быть и исследователь, вооруженный любыми приборами, и автоматизированная научная станция. Конкретная физическая природа объекта и сигналов для наших рассуждений в значительной степени безразлична (лишь в некоторых примерах мы будем говорить конкретно о свете или звуке).



Далее мы увидим, что при достаточно большой скорости объекта видимое движение может очень существенно отличаться от истинного. Так, видимая скорость может отличаться от истинной скорости объекта как по величине, так и по направлению. При этом видимые размеры объекта могут не совпадать с его истинными размерами.

Конечно, такие эффекты, связанные с распространением света (или радиоволн), должны быть особенно заметны в астрономии. И действительно, уже в течение многих лет астрономы наблюдают движение космических объектов со скоростью, превосходящей скорость света c. (Уточним, что при этом непосредственно измеряется лишь угловая скорость объекта, расстояние до объекта оценивается различными косвенными методами, и оказывается, что составляющая скорости, перпендикулярная лучу зрения, больше c.) После сказанного выше это не должно удивлять: видимая скорость может быть любой [1]. Эти эффекты анализировались и в научной литературе, и в литературе, доступной учащимся [2]. Сюжеты такого рода даже предлагались на международных олимпиадах школьников [3, 4].

Но, кажется, осталась незамеченной возможность элементарного графического анализа наблюдаемых эффектов. Вниманию читателей предлагается графический метод, позволяющий легко переходить от описания истинного движения объекта к описанию видимого движения (и обратно) и связывать соответствующие скорости и размеры. Наибольшее внимание будет уделено анализу одномерной ситуации, когда наблюдатель расположен на той же прямой, по которой движется объект.

Предлагаемый метод очень прост

Допустим, что все события происходят на прямой, вдоль которой будем отсчитывать координату s, полагая $s = 0$ в точке, где находится наблюдатель. Пусть в точке с координатой s в момент времени t произошло некое событие, сопровождающееся испусканием сигнала, и пусть этот сигнал распространяется со скоростью w. Ясно, что к наблюдателю сигнал придет в момент времени

$$t' = t + \frac{s}{w}.$$

Переведем сказанное на графический язык. График зависимости $s(t)$ и саму эту зависимость для разных объектов будем называть, как и в теории относительности, мировой линией. Везде ниже будем считать, что масштаб по осям на графиках выбран таким, чтобы мировые линии сигналов составляли с осями угол $45°$. Иными словами, за единицу измерения координаты мы выбираем расстояние, которое сигнал проходит за единицу времени. В этом случае тангенс угла наклона мировой линии объекта к оси абсцисс дает значение скорости объекта в единицах скорости сигнала w.

На рисунке 1 точка A графика представляет событие, которое произошло в точке с координатой s в момент времени t. Впрочем, нас интересуют события только одного типа – испускание сигнала. На этом и на других рисунках черными штриховыми линиями обозначены мировые линии сигналов. Наблюдатель увидит произошедшее событие в момент времени t' в точке с той же координатой s. Можно сказать, что точка A' – это видимое событие. Получается, что есть очень простое правило: чтобы на плоскости (s, t) перейти от истинного события к видимому событию, надо абсциссу точки, представляющей истинное событие, увеличить на величину ее ординаты. По этому правилу строятся все точки, представляющие видимые события, а их совокупность и есть мировая линия видимого объекта.

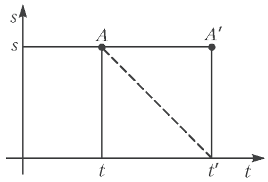


Рис.1

Указанный прием построения мировой линии видимого движения объекта будем использовать и в дальнейшем. На рисунках мировые линии объектов будем изображать синим цветом, а мировые линии видимых объектов – красным.

Рассмотрим случай, когда на наблюдателя (в положительном направлении оси s) движется какой-то объект со скоростью v, меньшей скорости сигнала w. Все скорости здесь и далее указаны в системе отсчета наблюдателя. На рисунке 2 для примера приведены мировые линии двух сигналов, испущенных объектом в разные моменты времени. Выполняя построения по сформулированному выше правилу, получаем точки A и B, принадлежащие мировой линии видимого объекта. На самом деле, для случая равномерного движения объекта достаточно построить лишь одну точку (вторая точка интересующей нас прямой – это точка пересечения мировой линии объекта с осью абсцисс). Так что предложенный прием действительно чрезвычайно прост.

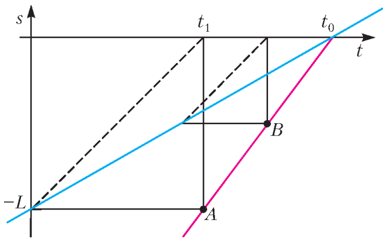


Рис.2

Пусть в начальный момент времениобъект находился на расстоянии L от наблюдателя, объект окажется рядом с наблюдателем в момент времени t_0, а сигнал придет к наблюдателю в момент времени t_1. Видно, что расстояние L видимый объект прошел за промежуток времени $t_0 - t_1$. Поэтому для скоростей сигнала, объекта и видимого объекта имеем соответственно

$$w = \frac{L}{t_1}, \quad v = \frac{L}{t_0}, \quad v' = \frac{L}{t_0 - t_1}.$$

Отсюда легко получить выражение для проекции видимой скорости на ось координат:

$$v_s' = \frac{v}{1-(v/w)}. \qquad (1)$$

Приглядимся внимательнее к последней формуле и обратим особое внимание на интересные частные случаи. Очевидно, что в рассматриваемом случае всегда $v' > v$, т.е. видимый объект движется быстрее, чем движется действительный объект (что видно и непосредственно из рисунка 2). Так, если объект движется со скоростью, равной половине скорости сигнала, то видимый объект будет двигаться со скоростью сигнала. А при скорости объекта $v > w/2$ видимая скорость v' будет превышать скорость сигнала. Поэтому, если речь идет о световом сигнале, наблюдатель будет видеть движение со сверхсветовой скоростью. В частности, если объект движется со скоростью сигнала, то $v' = \infty$. Это весьма наглядный результат: в этом случае все сигналы, испущенные объектом в разных точках траектории, движутся к наблюдателю вместе с объектом и достигнут наблюдателя одновременно, что он и воспримет как движение с бесконечно большой скоростью. Конечно, все отмеченные здесь соотношения легко получить и без формулы (1), лишь проводя соответствующие построения на графиках.

Так же легко можно проанализировать и другие возможные случаи. Пусть объект, рассматриваемый выше, минует наблюдателя и будет продолжать удаляться от него с той же скоростью. Соответствующие построения представлены на рисунке 3. Разумеется,

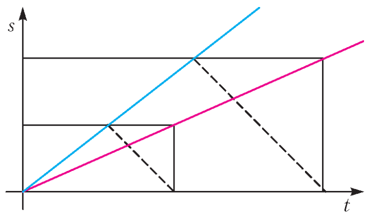


Рис.3

при этом надо рассматривать только сигналы, распространяющиеся назад, к наблюдателю. Легко видеть, что скорость видимого объекта v' в этом случае всегда меньше скорости истинного объекта v. Рассуждая так же, как и выше, несложно получить связь между скоростями в этом случае:

$$v_s' = \frac{v}{1+(v/w)}. \qquad (2)$$

Сверхзвуковой или сверхсветовой источник

Перейдем теперь к случаю, когда источник движется по направлению к наблюдателю со скоростью, превышающей скорость сигнала: $v > w$. Возможность сверхзвукового источника не нуждается в обсуждении. Но нет ничего необычного и в сверхсветовом источнике. Во-первых, какая-то частица может двигаться в веществе со скоростью, превышающей скорость света в этом веществе (но, разумеется, меньшей скорости света в вакууме c). Во-вторых, объект, движение которого мы описываем, может не быть (как это ни странно на первый взгляд) материальным телом. Например, источником света может быть зайчик от прожектора или лазера, бегущий по экрану. На скорость движения такого объекта никаких ограничений не накладывается (ибо никакого перемещения материального тела вдоль экрана не происходит и с помощью зайчика нельзя передать сигнал вдоль экрана).

Итак, пусть объект приближается к наблюдателю со скоростью, большей скорости сигнала. Ясно, что в этом случае все сигналы отстают от объекта и чем позже (т.е. чем ближе к наблюдателю) испущен сигнал, тем раньше он придет к наблюдателю. Иными словами, с течением времени к наблюдателю будут приходить сигналы от все более далеких точек – значит, видимый объект будет удаляться от наблюдателя в ту сторону, откуда приближался *действительный* объект! Соответствующие этому случаю построения выполнены на рисунке 4. Легко убедиться, что формула (1) остается справедливой и в этом случае. Но теперь она дает, что $v_s' < 0$, как и должно быть.

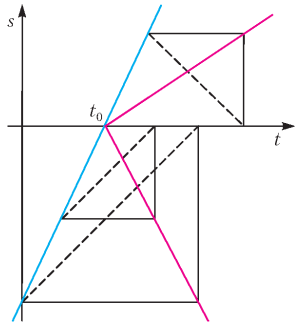


Рис.4

Когда источник минует наблюдателя и начнет удаляться от него, мы будем иметь удаляющийся в ту же сторону видимый источник, движущийся со скоростью $v' < v$. И здесь нет никакого качественного отличия от разобранного выше случая $v < w$ – в частности, остается справедливой формула (2). Из рисунка 4 со всей наглядностью следует удивительнейший вывод: с того момента как объект минует наблюдателя, тот будет видеть два объекта, удаляющихся от него в разные стороны с разными скоростями! А до этого момента наблюдатель вообще не видит объект.

Видимая длина объекта

Будем условно говорить о движении некоего «поезда». Например, такой *релятивистский поезд* встречается во многих учебных и научно-популярных книгах по специальной теории относительности.

При наблюдении движения какого-то объекта можно вести речь о разных длинах. Наблюдатель, неподвижный относительно объекта, измеряет его собственную длину L_0. Можно сказать, что L_0 – это длина объекта в собственной системе отсчета. Вопрос же о том, что такое длина движущегося объекта, нуждается в особом обсуждении.

Будем считать, что сигнал – это именно свет, так что $w = c$. Пусть движение объекта изучает движущийся относительно объекта наблюдатель. Он будет описывать движение объекта в своей системе отсчета, где он сам неподвижен. Для этого наблюдателя можно говорить о разных скоростях объекта (что мы уже обсудили) и о разных размерах объекта, соответственно двум способам получения информации о движении (об этом тоже уже говорилось). Поскольку нас интересуют большие скорости объекта, нам не обойтись без обращения к специальной теории относительности – СТО. Длиной движущегося объекта в СТО называется результат следующей измерительной процедуры: наблюдатель должен зафиксировать положения крайних точек тела в один и тот же момент времени (по часам своей системы отсчета, которые все синхронизированы) и потом любым способом измерить расстояние между этими неподвижными точками. Мы будем называть эту величину релятивистской длиной и обозначать ее L_r.

Но видимая длина объекта другая! Ведь при визуальном наблюдении, фотографировании и т.п. фиксируется изображение, создаваемое квантами, *пришедшими* к наблюдателю *в один и тот же момент времени*. Если речь идет о протяженном источнике, то испущены эти кванты были *в разные моменты времени*. Таким образом, длина L_r, которая фигурирует в СТО, и длина, которую увидит наблюдатель, или, в нашей терминологии, видимая длина объекта L' – это совершенно разные длины. И, конечно, они отличаются от собственной длины объекта L_0.

В СТО исследуется связь между L_0 и L_r и доказывается, что

$$L_r = L_0\sqrt{1-\left(v^2/c^2\right)}\,.$$

Нас же здесь интересует другое – соотношение между L' и L_r. Страшно произнести, но и сам Эйнштейн не различал эти длины и говорил в своих работах о «мгновенных снимках» там, где речь шла о длине L_r. И до 60-х годов XX века физики находились под гипнозом имени Эйнштейна и не различали эти длины.

Ясно, что для определения видимой длины поезда надо лишь провести описанные выше построения для головы и хвоста поезда – и получить результат непосредственно из рисунка. Пусть поезд движется по направлению к наблюдателю со скоростью $v < c$. Сигналы от головы и от хвоста поезда могут прийти к наблюдателю одновременно, если сигнал от хвоста был испущен в более ранний момент времени. Тогда видимая длина поезда окажется увеличенной по сравнению с L_r. Соответствующие построения проведены на рисунке 5 (это простое удвоение построений на рисунке 2), черные стрелки представляют поезд, они направлены от его хвоста к голове. Чтобы не загромождать рисунок, мировые линии сигналов и вспомогательные линии здесь не приведены.

Из рисунка 5 легко видеть (см. заштрихованные прямоугольные треугольники), что длины L_r и L' относятся как величины соответствующих скоростей, поэтому по формуле (1) имеем

$$L' = \frac{L_r}{1-(v/c)}\,,$$

т.е. в этом случае видимая длина больше релятивистской: $L' > L_r$.

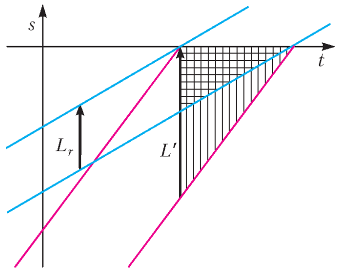


Рис.5

Теперь сравним видимую длину с собственной:

$$\frac{L'}{L_0} = \frac{\sqrt{1-\left(v^2/c^2\right)}}{\left(1-(v/c)\right)} = \sqrt{\frac{1+(v/c)}{1-(v/c)}} > 1\,.$$

Таким образом, в рассматриваемом случае видимая длина поезда *превосходит* не только его релятивистскую длину, но и его собственную длину. Поэтому кочующее по многим учебникам и пособиям небрежное утверждение, что наблюдатель (в направлении движения) увидит тело меньшего размера, чем L_0, неправильно. Следующее из СТО «сокращение длины» относится к релятивистской длине L_r, а не к видимой длине L'!

Если же поезд с произвольной скоростью v удаляется от наблюдателя, то, рассуждая аналогично, легко получить, что в этом случае

$$L' = \frac{L_r}{1+(v/c)}\,,$$

т.е. видимая длина меньше релятивистской: $L' < L_r$.

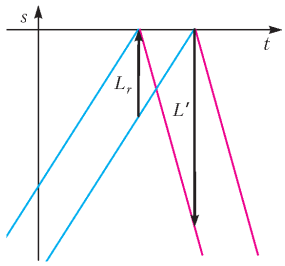


Рис.6

А что будет, если наш поезд движется на наблюдателя со сверхсветовой скоростью? Как мы уже знаем, видимый поезд будет теперь двигаться назад. Мало того, рисунок 6 отчетливо показывает, что поезд при этом не будет «пятиться задом», а развернется!

Наблюдатель в стороне от траектории

Расскажем кратко о возможности распространения предлагаемого метода на более общий случай. Пусть наблюдатель находится вне прямой, по которой равномерно со скоростью v движется объект, на расстоянии d от нее (рис.7). Ясно, что видимый объект движется по той же траектории – только с запаздыванием и с другой скоростью v'. Поскольку запаздыва-

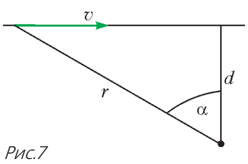


Рис.7

ние сигнала обусловлено лишь расстоянием r от объекта до наблюдателя, сосредоточим свое внимание на зависимости $r(t)$. Чтобы не вводить новых терминов, эту зависимость (и ее график) мы тоже будем называть мировой линией объекта. Сформулированное нами правило перехода к мировой линии видимого объекта сохраняется и в этом случае.

Предположим, что в момент времени $t = 0$ объект находится в точке, ближайшей к наблюдателю. Ясно, что

$$r^2 = v^2t^2 + d^2,$$

т.е. мировая линия объекта – это гипербола с асимптотами $r(t) = \pm vt$. По сути дела, случай $r \gg d$ уже полностью разобран выше, так что нам надо рассмотреть лишь область $r \sim d$. Для случая, когда скорость объекта больше скорости сигнала, мировые линии объекта и видимого объекта представлены на рисунке 8. Обсудим лишь некоторые интересные моменты.

Главный качественный результат нам уже известен – будут наблюдаться два разбегающихся в разные стороны видимых объекта. Понятно, что до какого-то момента времени t_A наблюдатель вообще не видит объект. В момент t_A наблюдатель впервые увидит объект, который при этом будет находиться в точке траектории, где угол наклона касательной к мировой линии равен $45°$, т.е. в точке, где радиальная составляющая скорости объекта v_r по величине равна скорости сигнала. Направление от наблюдателя на объект будем задавать углом наблюдения α и будем отсчитывать его от направления на ближайшую к наблюдателю точку траектории (см. рис.7). Очевидно, что $v_r = v \sin\alpha$, поэтому для наблюдателя объект возникнет под углом наблюдения

$$\alpha_0 = \arcsin\frac{w}{v}.$$

На рисунке 8 хорошо видно, что в любой момент времени $t' > t_A$ к наблюдателю одновременно придут два сигнала, испущенные объектом в разных точках траектории (по разные стороны от точки A), т.е. наблюдатель будет видеть два объекта. Интерпретация рисунка 8 несколько отличается от используемой выше, потому что мы перешли от переменной s (отсчитываемой вдоль траектории) к переменной r. Нижняя ветвь мировой линии видимого движения (начиная от точки A') соответствует движению видимого объекта вслед за объектом. Другой же видимый объект (ему соответствует верхняя ветвь) движется в противоположную сторону.

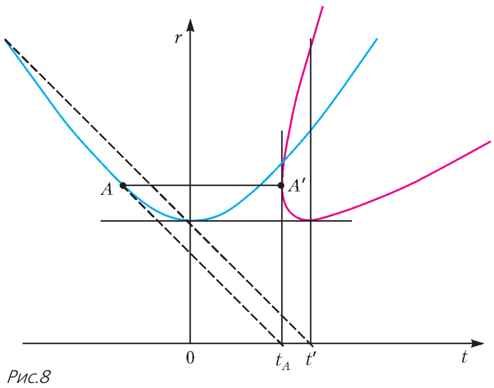


Рис.8

Боюсь, что читателю эти рассуждения покажутся весьма абстрактными, далекими «от жизни», но это не так. Без всяких изменений рисунок 8 описывает явления при пролете сверхзвукового самолета над головой наблюдателя. Наблюдатель услышит звук самолета только в момент времени t_A. Этот звук придет под углом $\alpha_0 = \arcsin(v_{зв}/v)$ к зениту ($v_{зв}$ – скорость звука). Мы уже понимаем, что в этот момент времени возникнут в одной точке два мнимых источника звука. В течение небольшого промежутка времени после момента t_A слуховой аппарат человека не разрешает эти два близких источника шума и «отказывается» указывать направление на источник звука. Но вскоре они разойдутся, при этом мнимый источник, движущийся вперед, будет находиться значительно ближе к наблюдателю, чем второй. На рисунке 8 очень хорошо видно, как далеко отстоят друг от друга мнимые источники в момент времени t', когда движущийся вперед источник находится над головой наблюдателя. Так что реально наблюдатель будет слышать только мнимый источник, движущийся вперед. Заметим еще, что на траектории вблизи точки, где наблюдатель впервые услышит самолет, радиальная скорость самолета мало отличается от скорости звука – при этом доплеровское изменение частоты очень велико, и потому в низком («басовитом») звуке самолета должны появиться очень высокие частоты (свист). Автор много раз «наблюдал» оба эти эффекта вблизи военного аэродрома при низком пролете сверхзвукового истребителя над головой. Именно после таких «наблюдений» у автора и возник интерес к этой теме.

Аналогично, при движении зайчика по экрану со сверхсветовой скоростью наблюдатель обнаружит, как в точке, видимой под углом наблюдения α_0, возникнут и разбегутся в разные стороны два зайчика.

Литература

1. *В.Л.Гинзбург*. О сверхсветовых источниках излучения. В сборнике: О теории относительности. – М.: Наука, 1979.
2. *Б.М.Болотовский.* Наблюдения за быстродвижущимися объектами. В сборнике: Школьникам о современной физике. – М.: Просвещение, 1990.
3. *С.М.Козел, В.А.Коровин, В.А.Орлов.* Физика. 10–11 кл.: Сборник задач и заданий. – М.: Мнемозина, 2001.
4. «Квант», 2007, №2, с.53.

Примечание редакции

Автор, по существу, рассматривал движущийся предмет либо малых размеров – точку, либо в виде прямой линейки, ориентированной по скорости. Представляет интерес также случай, когда движущаяся линейка ориентирована под прямым углом к скорости или вообще не параллельна скорости. Тогда можно показать, что наблюдатель будет видеть линейку искривленной.