

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

**К ОБЪЯСНЕНИЮ АБЕРРАЦИИ ЗВЁЗД В ТЕОРИИ  
ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ**

**Б. Н. Гиммельфарб**

**1. О ПОВТОРЕНИИ СТАРЫХ ЗАБЛУЖДЕНИЙ  
В НОВЫХ ИЗДАНИЯХ**

Объяснение, даваемое теорией относительности явлению aberrации звёзд, подверглось подробному обсуждению в 20-х годах, когда противники теории относительности выдвигали это объяснение как якобы приводящее к противоречиям с наблюдениями и потому могущее служить для опровержения теории (см., например, <sup>1</sup>). В ходе дискуссии выяснилось, что объяснение aberrации звёзд не представляет принципиальных трудностей для теории относительности и что источником этих кажущихся противоречий являются ошибочные рассуждения, в которых, во-первых, не учитываются реальные условия астрономических наблюдений, приводящих к обнаружению и измерению aberrации звёзд, и, во-вторых, выводы специальной теории относительности распространяются на случаи неинерциального движения, где они по существу неприложимы.

Вопрос был в основном разъяснён и притом в достаточно элемен-  
тарной форме в статье Эмдена <sup>2</sup>, где он рассматривается в рамках специальной теории относительности. Однако и эта статья Эмдена не лишена неверных утверждений. Кроме того, в некоторых новых изданиях, в том числе и в таких авторитетных, как Большая советская энциклопедия изд. 2-е <sup>3</sup>, и др., повторяется утверждение, что звёздная aberrация зависит от движения источника света относительно его приёмника, ошибочность чего была выяснена более 25 лет назад во время упомянутой дискуссии. Существующая в литературе путаница по этому вопросу до сих пор служит поводом для бесплодных попыток опровержения теории относительности <sup>4</sup>).

<sup>1</sup>) См., например, статью С. Б. Лукьянова, Астрон. журн., 30, 302 (1953).

Эти обстоятельства и побуждают нас вновь обратиться к рассмотрению затронутого вопроса.

В том, что звёздная aberrация не зависит от движения источника света, наиболее наглядно убеждает пример, который также приводился во время дискуссии в 20-х годах. Пример этот касается явлений, наблюдаемых в спектрально-двойных звёздах, и основан на том, что aberrационное смещение видимого положения звезды зависит от слагающей скорости, перпендикулярной к лучу зрения, а допплеровское смещение линий в спектре звезды зависит от лучевой слагающей её скорости.

Если бы звёздная aberrация определялась скоростью источника света по отношению к системе отсчёта наблюдателя, то в спектрально-двойных звёздах наблюдалось бы попрежнему то раздвоение спектральных линий, то визуальное разделение составляющих двойной звезды. Действительно, в положении I (рис. 1) имеет наибольшее значение разность лучевых слагающих скоростей, и следовательно, раздвоение спектральных линий достигает наибольшей величины, а в положении II наибольшее значение имеет разность слагающих скоростей, перпендикулярных лучу зрения, и, по предположению, видимые положения составляющих двойной звезды должны испытывать наибольшее aberrационное смещение в противоположные стороны. Эффект этот не мог бы ускользнуть от наблюдения, так как при скоростях порядка десятков и сотен  $км/сек$ , наблюдаемых в спектрально-двойных звёздах,

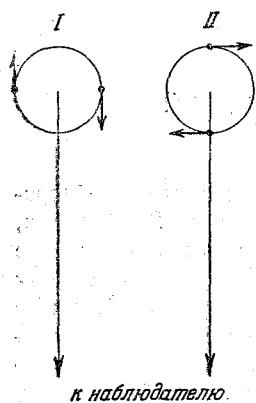


Рис. 1.

кажущееся разделение составляющих двойной звезды должно было бы достигать десятков и сотен угловых секунд\*), т. е. величины, заметной даже в малые телескопы и притом не зависящей от расстояния до звезды (так как в формулы звёздной aberrации и эффекта Доппеля не входят расстояния, а только скорости). Такое кажущееся разделение составляющих в спектрально-двойных звёздах не могло бы быть принято за действительное, потому что оно должно было бы происходить как раз в те моменты, когда спектроскопические данные указывают на то, что угловое расстояние между составляющими двойной звезды имеет наименьшую величину.

\*.) Это смещение, выраженное в секундах дуги, приближённо можно найти по формуле

$$\alpha = \frac{v}{c \sin 1''} = 0,7v,$$

где  $v$  — относительная скорость составляющих двойной звезды, выраженная в  $км/сек$ ,  $c$  — скорость света.

Доводы Ленарда и др.<sup>4</sup> сводились к следующему. Теория относительности признает лишь взаимное движение материальных тел; в явлении aberrации звёзд фигурируют два тела: наблюдаемая звезда и Земля, поэтому здесь должно проявляться движение наблюдаемой звезды по отношению к Земле; но так как приведённый пример прямо свидетельствует о том, что движение звезды здесь не при чём, то, следовательно, aberrация звёзд может служить для обнаружения абсолютного движения Земли и тем самым является опровержением основного постулата теории относительности.

Ошибка Ленарда и его последователей заключалась в самом исходном пункте их рассуждений, так как они приписывали теории относительности отнюдь не вытекающее из неё неверное утверждение, что aberrация звёзд зависит от движения наблюдаемого светила по отношению к телескопу. Но нужно сказать, что такое утверждение нередко встречается в литературе по теории относительности в более или менее явной форме (примеры см. в цитированной статье Эмдена<sup>2</sup>). В известной общедоступной книжке «О специальной и общей теории относительности» А. Эйнштейн писал: «Я упомяну здесь, как об особенно существенном, о том, что теория относительности крайне не просто объясняет влияние движения Земли относительно неподвижных звёзд на свет, посыпаемый этими звёздами к нам. Таковы годичный ход кажущегося положения звезды, вызываемый движением Земли вокруг Солнца (абберрация света), и влияние радиальной слагающей движения неподвижных звёзд относительно Земли на окраску света, доходящего до нас... (принцип Допплера)<sup>5</sup>. Эта выдержанка приводилась в качестве свидетельства того, что и сам основоположник теории относительности также придерживается мнения о зависимости aberrации звёзд от движения источника света по отношению к его приёмнику<sup>6</sup>. Однако в своё время Тирринг<sup>7</sup> пояснил, что здесь имеется в виду движение Земли не по отношению к какой-либо данной звезде, а по отношению к совокупности всех звёзд и что возможность обнаружить посредством физических экспериментов непрямoliniйное движение Земли по отношению к этой инерциальной системе «неподвижных звёзд» не противоречит теории относительности.

На самом деле из теории относительности следует, что изменение частоты света (эффект Допплера) и направления светового луча (абберрация звёзд) происходит при переходе от любой системы отсчёта к любой другой, движущейся по отношению к первой. Взаимное движение каких именно систем отсчёта проявляется в том или ином случае, зависит от конкретных условий эксперимента (наблюдений). Так, при спектроскопических исследованиях движений небесных светил обычно проявляется скорость светила по отношению к Земле, поскольку положение линий в спектре данного светила сопоставляется с положением соответствующих линий в спектре земного источника, неподвижного относительно спектроскопа. Но уже

в рассмотренном примере наблюдения спектрально-двойной звезды движение Земли как системы отсчёта исключается, так как сравниваются взаимные положения линий в спектрах двух составляющих двойной звезды и тем самым измеряется скорость движения этих составляющих друг относительно друга. Наоборот, при наблюдении звёздной аберрации исключается движение светила, а имеет значение скорость орбитального движения Земли (в случае годичной аберрации звёзд) или линейная скорость телескопа в суточном вращении Земли (в случае суточной аберрации).

При этом имеется в виду, конечно, не «абсолютное» движение Земли, т. е. не движение её по отношению к гипотетической светоносной среде. Годичная аберрация звёзд представляет отличие направления светового луча в системе отсчёта, связанной с центром тяжести Земли, от направления того же луча в системе отсчёта, связанной с центром тяжести Солнца. Суточная аберрация представляет отличие направления светового луча в системе отсчёта, в которой покоятся телескоп, от направления того же луча в системе отсчёта, связанной с центром Земли. И в том и в другом случае звёздная аберрация проявляется в изменении со временем направления светового луча и соответственно в изменении со временем видимого места светила, что в свою очередь вызывается изменением по направлению (а в случае годичной аберрации также и по величине) скорости движения системы отсчёта, связанной с телескопом. Это, естественно, следует из того, что аберрация звёзд всегда существует только как эффект относительного движения. Поэтому она наблюдается лишь в тех случаях, когда телескоп переходит из одной инерциальной системы в другую, движущуюся относительно первой. Изменение направления движения телескопа именно равнозначно его переходу из одной мгновенной инерциальной системы в другую, чём и обусловливается изменение регистрируемого им направления светового луча. В тех случаях, когда скорость движения системы отсчёта в течение очень долгого времени остаётся неизменной по величине и направлению, как, например, в случае движения Земли вместе со всей солнечной системой по отношению к системе «неподвижных звёзд», вызываемая этим движением «вековая аберрация» может быть только вычислена, но не может быть непосредственно измерена.

Из приведённых соображений следует, что аберрация звёзд в известном отношении представляет оптический аналог опыта с маятником Фуко: оба определяют некоторую плоскость в пространстве, которая остаётся неподвижной в инерциальной системе отсчёта и поворачивается во врачающейся системе отсчёта. В механическом опыте такой плоскостью служит плоскость качания свободно подвешенного маятника, а в оптическом опыте — плоскость, проходящая через луч света и вектор мгновенной скорости движения его приёмника (телескопа).

## 2. ЗВЁЗДНАЯ АБЕРРАЦИЯ И ПЛАНЕТНАЯ АБЕРРАЦИЯ

Из сказанного в предыдущем разделе следует, что с точки зрения теории относительности aberrация звёзд в инерциальной системе существует не сама по себе, а только по отношению к другой инерциальной системе, принимаемой за неподвижную, причём движение светила относительно каждой из рассматриваемых систем отсчёта не имеет значения. По установившейся терминологии положение светила на небесной сфере, изменённое звёздной aberrацией, называется в астрономии видимым местом, а освобождённое от влияния звёздной aberrации, т. е. соответствующее системе отсчёта, принимаемой за неподвижную, истинным местом. Следует отметить, что такая терминология отнюдь не отражает действительного положения вещей, так как «истинное» в указанном смысле положение светила не менее иллюзорно, чем видимое его положение, ибо оно соответствует не направлению прямой, соединяющей одновременные положения светила и креста нитей в окуляре телескопа, а лишь направлению светового луча в системе отсчёта, принимаемой за неподвижную. За промежуток времени, в течение которого свет проходит расстояние от светила до телескопа, т. е. за так называемое aberrационное время, светило успевает удалиться из той точки, в которой оно находилось в момент испускания света, достигшего телескопа в момент наблюдения. Это смещение светила за aberrационное время носит название планетной aberrации. При расстояниях, с которыми приходится встречаться в астрономии, измеряемых многими световыми годами, это смещение может быть весьма значительным.

Таким образом, сущность звёздной aberrации заключается в различии направления светового луча в разных системах отсчёта, движущихся друг относительно друга, а сущность планетной aberrации — в различии направления светового луча и прямой, соединяющей одновременные положения светила и телескопа. Поэтому проводимое в «Курсе сферической астрономии» С. Н. Блажко<sup>8</sup> настойчивое противопоставление «истинного» положения, как бы истинного в полном смысле слова, видимому положению, которое цитированный автор предлагает называть «кажущимся», и употребление там же выражения «направление от наблюдателя к светилу» без ясного указания о том, что имеется в виду направление луча света, идущего от данного светила, а не направление прямой, соединяющей одновременные положения светила и телескопа, могут лишь ввести учащегося в заблуждение. Такой опасности избегнул автор более старого аналогичного учебника С. А. Казаков<sup>9</sup>, который различает истинное положение светила (т. е. освобождённое от влияния звёздной aberrации) от действительного его положения, получаемого в результате учёта также и планетной aberrации.

Ввиду того, что звёздная аберрация не зависит от движения источника света, она должна существовать также и в движущейся системе отсчёта, относительно которой источник света неподвижен. При этом, когда мы говорим о движущейся системе отсчёта, мы имеём в виду её движение относительно некоторой другой инерциальной системы отсчёта, принимаемой нами за неподвижную.

Рассмотрим две системы отсчёта  $K$  и  $K'$ , движущиеся равномерно и прямолинейно навстречу друг другу вдоль прямой  $MN$  (рис. 2):

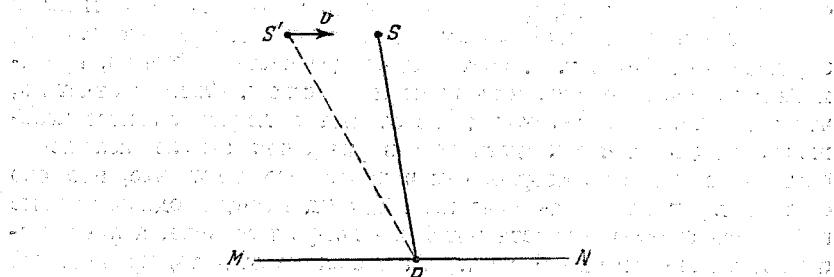


Рис. 2.

Пусть источник света  $S$  неподвижен по отношению к системе отсчёта  $K$ , которая движется со скоростью  $v$  относительно системы отсчёта  $K'$ . В тот момент, когда начала координат обеих систем отсчёта совпадают в точке  $P$ , в обеих системах производится измерение положения светила  $S$ . Луч света, имеющий в системе отсчёта  $K$  направление  $SP$ , будет иметь в системе отсчёта  $K'$  направление  $S'P$ .

Так как обе рассматриваемые системы отсчёта инерциальные, то они физически равноправны. Между ними существует отношение полной взаимности: каждую из них с одинаковым правом можно считать неподвижной и рассматривать движение другой по отношению к ней. Тогда звёздная аберрация будет отсутствовать в системе отсчёта, принятой за неподвижную, и будет существовать во второй системе, движущейся относительно первой.

Наблюдатель, находящийся в системе отсчёта  $K$  и считающий её неподвижной, видит светило в точке  $S$  и считает эту точку истинным положением светила, так как в неподвижной системе отсчёта звёздная аберрация отсутствует. Положение же  $S'$ , в котором то же светило видит наблюдатель, движущийся со скоростью  $-v$  вместе с системой отсчёта  $K'$ , наблюдатель, находящийся в системе отсчёта  $K$ , считает кажущимся, смещённым вследствие звёздной аберрации, вызываемой движением системы отсчёта  $K'$ .

Но наблюдатель, находящийся в системе отсчёта  $K'$ , также инерциальной, как и система отсчёта  $K$ , вправе считать неподвижной свою систему отсчёта, а систему отсчёта  $K$  считать движущейся. Полагая свою систему отсчёта неподвижной, наблюдатель в си-

стеме отсчёта  $K'$  принимает точку  $S'$ , в которой он видит светило, за истинное положение этого светила, так как в неподвижной системе отсчёта звёздная аберрация отсутствует. Положение  $S$ , в котором то же светило видит наблюдатель, движущийся со скоростью  $v$  вместе с системой отсчёта  $K$ , наблюдатель, находящийся в системе отсчёта  $K'$ , считает кажущимся, смещённым вследствие звёздной аберрации, вызываемой движением системы отсчёта  $K$ .

Но по отношению к системе отсчёта  $K$  светило  $S$  неподвижно. Поэтому истинное положение его, определённое в этой системе отсчёта, и есть его действительное положение в момент наблюдения: планетная аберрация светила  $S$  по отношению к системе отсчёта  $K'$  отсутствует. По отношению же к системе отсчёта  $K'$  светило  $S$  движется со скоростью  $v$ . Поэтому «истинное» положение его  $S'$ , определённое в системе отсчёта  $K'$ , не есть его действительное положение в момент наблюдения: оно указывает направление, по которому в системе отсчёта  $K'$  пришёл луч света от светила в точку  $P$ , но не направление прямой, соединяющей точку  $P$  со светилом в момент наблюдения. За промежуток времени, в течение которого свет прошёл расстояние от светила до точки  $P$ , т. е. за аберрационное время, светило успело переместиться из точки  $S'$  в точку  $S$ .

Следовательно, с точки зрения системы отсчёта  $K'$  видимое положение светила  $S$ , определяемое из системы отсчёта  $K$ , которая движется вместе со светилом, совпадает с действительным положением светила в момент наблюдения, но этот факт объясняется не отсутствием аберрации звёзд в системе отсчёта  $K$ , а планетной аберрацией, вызываемой движением самого светила и компенсирующей влияние звёздной аберрации в системе отсчёта, которая движется вместе со светилом.

Из приведённых рассуждений следует, что звёздная аберрация, имеющая место, если за неподвижную принять систему отсчёта, связанную со светилом, переходит в планетную аберрацию, если за неподвижную принять систему отсчёта, связанную с телескопом. Подобная взаимность звёздной и планетной аберраций существует лишь по отношению к инерциальным системам отсчёта. В общем случае принципиальная разница между звёздной и планетной аберрациями заключается в том, что звёздная аберрация зависит от мгновенной скорости системы отсчёта наблюдателя и не зависит от расстояния между светилом и телескопом, а планетная аберрация зависит от конечного перемещения светила за аберрационное время, которое зависит от этого расстояния. Именно  $\tau = \frac{r}{c}$ , где  $\tau$  — аберрационное время,  $r = S'P$ ,  $c$  — скорость света.

Впрочем, неинерциальную систему, строго говоря, нельзя наравне с инерциальными системами безусловно принимать за неподвижную<sup>10</sup>, а потому по отношению к неинерциальным системам взаимность явлений отсутствует. Забвение этого обстоятельства приводит

к мнимым парадоксам относительности, примером которых может служить известный «парадокс с часами», недавно вновь обсуждавшийся на страницах журнала «Nature»<sup>11, 12</sup>.

Итак, видимое положение светила определяется звёздной aberrацией (*aberratio fixarum*), которая зависит от мгновенной скорости системы отсчёта, связанной с телескопом, а действительное положение светила в момент наблюдения определяется планетной aberrацией (*aberratio planetarum*), зависящей от конечного перемещения самого светила за aberrационное время, причём движение и светила и телескопа отнесено к некоторой инерциальной системе отсчёта, принятой за неподвижную.

### 3. ОБ ОТЛИЧИИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ТРАКТОВКИ АБЕРРАЦИИ ЗВЁЗД ОТ КЛАССИЧЕСКОЙ. ЛУЧЕВОЕ РАССМОТРЕНИЕ

Если  $K'$  — инерциальная система отсчёта, движущаяся со скоростью  $v$  относительно инерциальной системы отсчёта  $K$ , то луч света, который в системе  $K$  составляет угол  $\vartheta$  с направлением взаимного движения этих систем, составит в системе  $K'$  угол  $\vartheta'$  с тем же направлением, причём соотношение между углами  $\vartheta$  и  $\vartheta'$  даётся формулой

$$\operatorname{ctg} \vartheta' = \frac{\operatorname{ctg} \vartheta + \beta \operatorname{cosec} \vartheta}{\sqrt{1 - \beta^2}}, \quad (1)$$

где, как обычно,  $\beta = \frac{v}{c}$ ,  $c$  — скорость света. Обыкновенно эту формулу получают применяя преобразования Лоренца к уравнению траектории светового луча<sup>13</sup> или как частный случай теоремы сло-

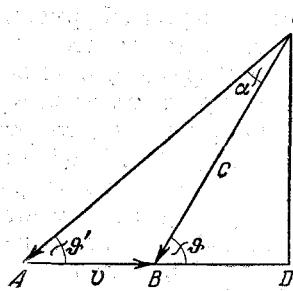


Рис. 3.

редко затемняемый математическими выкладками в более строгих выводах.

Обозначим (рис. 3) отрезки  $AD$  и  $CD$ , посредством которых определяется угол  $\vartheta'$ , соответственно  $x$  и  $y$ , если они измеряются в масштабах системы отсчёта  $K$ , и  $x'$ ,  $y'$  — в масштабах системы

Отсчёта  $K'$ . Ввиду того, что угол  $\vartheta'$  измеряется в системе  $K'$ , отрезки, посредством которых он определяется, нужно выражать в масштабах этой системы отсчёта:

$$\operatorname{ctg} \vartheta' = \frac{x'}{y'} \quad (2)$$

Система отсчёта  $K'$  движется со скоростью  $v$  относительно системы отсчёта  $K$ . Поэтому между единичными масштабами длины  $\xi$  в направлении относительного движения систем отсчёта и  $\eta$  в направлении, перпендикулярном ему в системе отсчёта  $K$ , и соответственными единичными масштабами длины  $\xi'$  и  $\eta'$  в системе отсчёта  $K'$  существуют соотношения

$$\xi' = \xi \sqrt{1 - \beta^2}; \quad \eta' = \eta. \quad (3)$$

В элементарном изложении эти соотношения можно привести в качестве экспериментального факта, вытекающего, например, из отрицательного результата опыта Майкельсона. Далее, имеем очевидные соотношения

$$x\xi = x'\xi'; \quad y\eta = y'\eta', \quad (4)$$

откуда, принимая во внимание соотношения (3),

$$x' = \frac{x}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad y' = y. \quad (5)$$

Подставляя отсюда  $x'$  и  $y'$  в (2), имеем:

$$\operatorname{ctg} \vartheta' = \frac{x}{y \sqrt{1 - \beta^2}}. \quad (6)$$

Выразим теперь  $x$  и  $y$  через функции угла  $\vartheta$ :

$$x = c \cos \vartheta + v; \quad y = c \sin \vartheta \quad (7)$$

и подставим в (6). Тогда получим:

$$\operatorname{ctg} \vartheta' = \frac{c \cos \vartheta + v}{c \sin \vartheta \sqrt{1 - \beta^2}}$$

или

$$\operatorname{ctg} \vartheta' = \frac{\operatorname{ctg} \vartheta + \beta \operatorname{cosec} \vartheta}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Это и есть релятивистская формула aberrации звёзд (1).

Выражая отрезки, посредством которых определяется угол  $\vartheta'$ , в масштабах системы отсчёта  $K$  (определенный так угол  $\vartheta'$  обозначим  $\vartheta_0$ ), получим классическую формулу aberrации звёзд:

$$\operatorname{ctg} \vartheta_0' = \frac{x}{y} = \frac{c \cos \vartheta + v}{c \sin \vartheta},$$

откуда

$$\operatorname{ctg} \vartheta_0' = \operatorname{ctg} \vartheta + \beta \operatorname{cosec} \vartheta. \quad (8)$$

Формула (8) отличается от формулы (1) лишь отсутствием множителя  $\sqrt{1 - \beta^2}$  в знаменателе правой части. Как видно из приведенного вывода, этот множитель появляется вследствие сокращения масштаба длины в направлении движения системы отсчета при неизменности масштаба в перпендикулярном направлении.

Введя угол aberrации  $\alpha = \vartheta - \vartheta'_0$ , формулу (8) легко преобразовать к обычному виду:

$$\sin \alpha = \beta \sin \vartheta'_0. \quad (9)$$

Эту формулу можно получить из чертежа (рис. 3) и непосредственно.

Следовательно, классическая формула aberrации соответствует описанию явления так, как оно происходит с точки зрения системы отсчета, принимаемой за неподвижную.

Ввиду того, что во всех реально встречающихся в астрономии случаях  $\alpha$  — малый угол, обычно в формуле (9) синус его заменяют дугой, а в правой части пренебрегают различием  $\vartheta$  и  $\vartheta'_0$ . Тогда

$$\alpha'' = k \sin \vartheta, \quad (10)$$

где  $\alpha''$  — aberrационный угол, выраженный в секундах дуги, а  $k = \frac{\beta}{\sin 1''}$  — так называемая aberrационная постоянная.

Подставляя  $\vartheta = 90^\circ$  в формулу (10), мы видим, что aberrационная постоянная равна aberrационному смещению светила, луч от которого приходит под прямым углом к направлению движения телескопа. Полагая  $\vartheta = 90^\circ$  в формуле (1), получаем:

$$\operatorname{ctg} \vartheta' = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Эту величину, также характеризующую aberrационное смещение светила, находящегося на угловом расстоянии  $\vartheta = 90^\circ$  от апекса наблюдателя, можно назвать aberrационной постоянной с релятивистской поправкой. Однако aberrационное смещение светила, находящегося на произвольном угловом расстоянии  $\vartheta$  от апекса наблюдателя, не выражается формулами теории относительности так просто через aberrационную постоянную, как классической формулой (10).

Следует упомянуть о том, что в заметке, напечатанной в журнале «Природа»<sup>15</sup>, нами был дан чрезвычайно элементарный вывод aberrационной постоянной с релятивистской поправкой непосредственно из основных положений специальной теории относительности, без ссылок на какие-либо формулы, так как необходимое преобразова-

ние промежутка времени получается там попутно из рассмотрения самого явления aberrации звёзд\*).

Разлагая формулу (1) в ряд по степеням  $\beta$  и сравнивая с формулой (8), мы видим, что aberrационное смещение, требуемое теорией относительности, отличается от классического в членах порядка  $\beta^2$ :

$$\operatorname{ctg} \vartheta' = \operatorname{ctg} \vartheta + \beta \operatorname{cosec} \vartheta + \frac{1}{2} \beta^2 \operatorname{ctg} \vartheta + \dots, \quad (11)$$

а релятивистская поправка к aberrационной постоянной имеет величину, ещё на порядок меньшую:

$$\frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \beta + \frac{1}{2} \beta^3 - \dots \quad (12)$$

В случае годичной aberrации звёзд  $\beta = 10^{-4}$ , следовательно,  $\frac{\beta^2}{\sin 1''} \sim 0'',001$ , что лежит за пределами точности астрометрических измерений. Кроме того, определение aberrационной постоянной связано со специальными трудностями, вследствие чего наименее точные её определения не свободны от систематических ошибок. Поэтому на международном совещании по астрономическим постоянным, состоявшемся в Париже в 1950 г., было решено исключить её из числа фундаментальных астрономических постоянных, которые определяются непосредственно из наблюдений, и в дальнейшем выводить её числовое значение из параллакса Солнца<sup>16</sup>.

#### 4. ОБ ОТЛИЧИИ РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ТРАКТОВКИ АБЕРРАЦИИ ЗВЁЗД ОТ КЛАССИЧЕСКОЙ. ВОЛНОВОЕ РАССМОТРЕНИЕ

До сих пор мы рассматривали лишь кинематический (лучевой) аспект явления. Различие классического и релятивистского объяснения aberrации звёзд более отчётливо выявляется при рассмотрении волнового аспекта явления.

С точки зрения классической теории (теории эфира) aberrация служит свидетельством движения телескопа по отношению к гипотетической светоносной среде. Такое движение ведёт к отставанию световых волн, прошедших сквозь входное отверстие прибора,

\*.) Нужно отметить, что в указанной заметке<sup>15</sup> повторяется неточность, о которой шла речь в первом разделе настоящей статьи: в приведённых там рассуждениях говорится о системе отсчёта, связанной с Землёй, и системе отсчёта, связанной со звездой, тогда как в действительности второй из рассматриваемых систем отсчёта должна быть система, связанная с Солнцем. Кроме того, данный там вывод заключает неявно предположение, что масштабы длины не испытывают лоренцева сокращения в направлении, перпендикулярном направлению движения системы отсчёта.

в направлении, противоположном направлению движения прибора («эфирный ветер»), в результате чего создаётся наклон волновой нормали  $n$  к лучу  $r$ , равный аберрационному повороту луча (рис. 4). Подобный наклон является естественным следствием того, что волновые поверхности во всех системах отсчёта имеют одинаковое положение, тогда как направление луча света зависит от скорости движения воспринимающего его телескопа. Наличие наклона волновой нормали к направлению луча света отличает движущуюся систему отсчёта от покоящейся и, следовательно, может служить свидетельством абсолютного движения системы отсчёта, в которой производится наблюдения.

С точки зрения специальной теории относительности все инерциальные системы отсчёта физически равноправны, и никакого наклона волновой нормали к лучу во всех таких системах не наблюдалось. Объясняется это тем, что волновая поверхность есть поверхность одновременно равных фаз, а события, одновременные в одной системе отсчёта, не одновременны в других системах отсчёта, движущихся относительно этой системы. Поэтому в разных системах отсчёта, движущихся друг относительно друга, волновые поверхности занимают различное положение, как различно и направление луча света, в зависимости от скорости движения системы отсчёта.

Итак, можно сказать, что в классическом объяснении аберрации звёзд наклон волновой нормали к лучу возникает ввиду абсолютного характера одновременности, вследствие чего события, одновременные в какой-либо системе отсчёта, одновременны также и во всех других системах отсчёта, а в релятивистском объяснении явления такой наклон отсутствует ввиду относительного характера одновременности, вследствие чего события, одновременные в одной системе отсчёта, не одновременны в других системах отсчёта, движущихся по отношению к первой.

Исходя из того, что, как было сказано выше, в инерциальной системе аберрация звёзд существует не сама по себе, а лишь по отношению к другим подобным системам, Эмден в цитированной статье<sup>2</sup> говорит, что согласно специальной теории относительности вообще не существует аберрации звёзд. Мы видим, что это положение подтверждается рассмотрением волнового аспекта явления. Но в той же статье Эмден утверждает, что в случаях равномерного и прямолинейного движения системы отсчёта аберрация звёзд

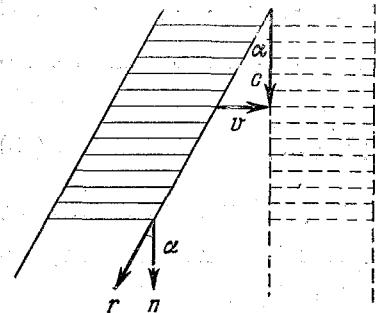


Рис. 4.

в ней не может быть обнаружена посредством наблюдений с точки зрения теории эфира в такой же мере, как и с точки зрения теории относительности, так как «лишь механически, а не оптически данное стандартное направление делает возможным измерение aberrации». Последнее утверждение верно лишь постольку, поскольку предполагается обнаружение и измерение aberrации звёзд средствами астрометрии, которое возможно лишь при условии изменения со временем направления или скорости движения системы отсчёта. Но это утверждение вообще неверно, так как классическое объяснение aberrации звёзд приводит к наличию наклона волновой нормали к направлению луча света и тем самым может служить основой для интерференционного эксперимента, в котором ожидаемый эффект находится в пределах достижимой на опыте точности измерений. В таком эксперименте с классической точки зрения волновая нормаль как раз выступает в качестве «оптически данного стандартного направления», общего для всех систем отсчёта и совпадающего с лучом света в системе отсчёта, которая покоятся относительно светносной среды.

Хотя наклон волновой нормали к лучу имеет величину порядка  $\beta$ , легко показать, что и здесь, как вообще во всех случаях, где проявляются различия классической и релятивистской трактовки явлений, наблюдению оказываются доступными лишь величины порядка  $\beta^2$ . Рассмотрим схему возможного опыта для определения этого наклона при максимальном угле aberrации, соответствующем угловому расстоянию светила от апекса наблюдателя  $\theta = 90^\circ$  (рис. 5).

Прямая  $AB$  перпендикулярна к пучку параллельных лучей, наклонённых вследствие aberrации на угол  $\alpha$  к перпендикуляру к направлению движения прибора. Ввиду того, что волновые плоскости параллельны направлению движения прибора, между волнами в точках  $A$  и  $B$  существует разность хода, равная  $BD = b \operatorname{tg} \alpha$ , где  $b = AB$ .

Но  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{v}{c}$ , где  $v$  — скорость движения прибора. Следовательно, колебание в точке  $B$  запаздывает по отношению к колебанию в точке  $A$  на время  $t_1 = \frac{bv}{c^2}$ .

Для обнаружения этой разности хода в точке  $A$  помещается зеркало, которое направляет луч  $1$  в точку  $B$ , где с ним соединяется луч  $2$ , отражающийся от полупрозрачного зеркала, которое помещается в этой точке, а затем оба луча попадают в трубу  $L$ ,

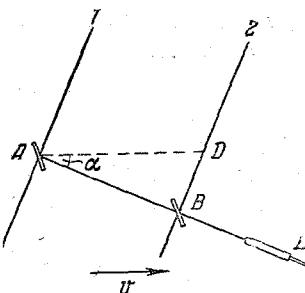


Рис. 5.

при помощи которой производятся наблюдения возникающей интерференционной картины. Если бы в точках  $A$  и  $B$  не существовало разности хода между лучами 1 и 2, то при соединении лучей в точке  $B$  она возникла бы вследствие того, что после отражения от зеркала  $A$  луч 1 должен потратить промежуток времени  $t_2 = \frac{b}{c}$ , чтобы достигнуть точки  $B$  при условии, что прибор неподвижен по отношению к светоносной среде. Движение прибора, помимо того, что оно приводит к возникновению разности фаз в точках  $A$  и  $B$ , должно вызвать также и изменение промежутка времени, затрачиваемого светом на прохождение отрезка  $AB$ . При движении прибора со скоростью  $v$  соответствующий промежуток времени

$$t_3 = \frac{b}{c - v \cos \alpha}.$$

Ввиду малости угла  $\alpha$  можно с достаточной точностью положить  $\cos \alpha = 1$ , тогда

$$t_3 - t_2 = \frac{bv}{c(c - v)}.$$

Итак, запаздывание луча 1 по отношению к лучу 2 при их соединении в точке  $B$  по сравнению с тем, которое должно получиться при неподвижном приборе, равно

$$t = (t_3 - t_2) - t_1 = \frac{bv}{c(c - v)} - \frac{bv}{c^2},$$

откуда, с точностью до членов порядка  $\beta^2$

$$t = \frac{b}{c} \beta^2. \quad (13)$$

Разделив  $t$  на период колебаний  $T$ , получаем величину ожидаемого сдвига интерференционных полос:

$$\Delta = \frac{b}{cT} \beta^2$$

или, принимая во внимание, что  $cT = \lambda$ ,

$$\Delta = \frac{b}{\lambda} \beta^2. \quad (14)$$

Подставляя для видимого света  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ см}$  и для орбитального движения Земли  $\beta = 10^{-4}$ , имеем при  $b = 500 \text{ см}$   $\Delta = 0,1$ , т. е. смещение на  $1/10$  полосы — величина, вполне доступная измерениям.

Обсуждать детально возможности осуществления подобного эксперимента<sup>\*)</sup> едва ли целесообразно, так как отрицательный результат его можно с уверенностью предсказать на основании существующих данных других экспериментов. В частности, на основании отрицательного результата опыта Майкельсона не выдерживает критики расчёт различия промежутков времени  $t_2$  и  $t_3$ . Приняв же это следствие из опыта Майкельсона, нужно принять и дальнейшие следствия из него, а следовательно, отказаться и от предположения о существовании наклона волновой нормали к направлению луча в движущихся системах отсчёта и тем самым — от наличия запаздывания  $t_1$ .

Мы привели этот пример лишь для подтверждения того, что с точки зрения теории эфира звёздная aberrация (в виде наклона волновой нормали к направлению луча) могла бы быть обнаружена экспериментально и в системе отсчёта, движущейся прямолинейно и равномерно, а также для опровержения ошибочного противоположного утверждения в статье Эмдена. С точки зрения теории относительности aberrация звёзд действительно существует сама по себе — как изменение со временем направления светового луча и соответственно видимого положения звезды<sup>\*\*)</sup> лишь в системах отсчёта, скорость которых меняется со временем по величине или направлению, т. е. в неинерциальных системах.

<sup>\*)</sup> Затруднение здесь может возникнуть в связи с невозможностью наблюдения интерференции на больших разностях хода (при недостаточно монохроматическом источнике света). Его можно преодолеть, если вместо прямого луча воспользоваться лучом, отражённым в направлении, перпендикулярном направлению движения прибора. При такой схеме (рис. 6,  $AB = BC$ ) порядок величины ожидаемого эффекта остаётся таким же, меняется лишь численный коэффициент (как в соответствующем расчёте, связанном с опытом Майкельсона). Кроме того, подобная схема позволяет поворотом всей установки на  $90^\circ$  вокруг направления луча поменять ролями зеркала  $A$  и  $C$  (это изображено прерывистыми линиями на рис. 6), в результате чего разность хода должна изменить знак, т. е. можно было бы ожидать реального смещения интерференционных полос.

<sup>\*\*) Заметим, что в Большой советской энциклопедии<sup>3</sup> aberrация определяется именно как «изменение видимого положения звезды на небесной сфере, вызываемое тем, что Земля движется вокруг Солнца и непрерывно меняет направление своего движения относительно звёзд».</sup>

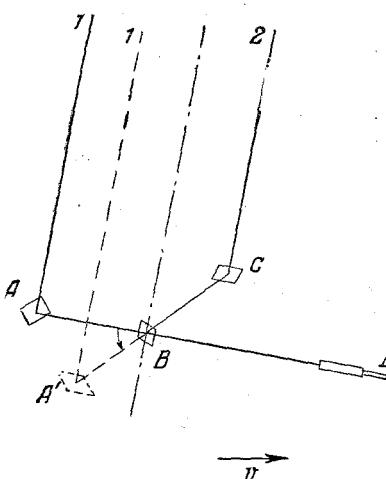


Рис. 6.

Так как в классической теории звёздная aberrация есть следствие абсолютного движения системы отсчёта, то она должна существовать и при совместном движении источника света и воспринимающего его прибора по отношению к гипотетической светоносной среде. И в этом случае она должна выражаться в наклоне волновой нормали к направлению луча<sup>17</sup>. Согласно теории относительности, такой наклон отсутствует во всех случаях. Как и в опыте Майкельсона, для явления звёздной aberrации безразлично, пользоваться ли земным или космическим источником света, так как движение самого источника света здесь не имеет значения.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Иоос, УФН 6, 21 (1926).
2. R. Emde, Naturwissenschaften 14, 329 (1926).
3. ВСЭ, изд. 2-е, том 1, статья «Аберрация света».
4. P. Lenard и F. Schmidt, Zeits. f. techn. Phys. 6, 81 (1925).
5. А. Эйнштейн, О специальной и общей теории относительности, Петроград, 1923, стр. 42.
6. R. Tomaschek, Ann. d. Phys. 74, 136 (1924).
7. H. Thirring, Zeits. f. techn. Phys. 6, 561 (1925).
8. С. Н. Блажко, Курс сферической астрономии, Гостехиздат, 1948, § 76.
9. С. А. Казаков, Курс сферической астрономии. Изд. 2-е. Гостехиздат, 1940, § 48.
10. В. А. Фок, Система Коперника и система Птоломея в свете общей теории относительности. В кн.: Николай Коперник (сборник статей к 400-летию со дня смерти), Изд. АН СССР, 1947.
11. W. H. McCrea, Nature 167, 680 (1951).
12. H. E. Ives, Nature 168, 246 (1951).
13. П. Г. Бергман, Введение в теорию относительности, ИЛ, 1947, стр. 59.
14. Л. Ландау и Е. Лифшиц, Теория поля, Гостехиздат, 1948, § 5.
15. Б. Н. Гиммельфарб, Природа, № 8, 28 (1951).
16. М. С. Зверев, Астрон. журн. 28, 125 (1951).
17. С. И. Вавилов, Экспериментальные основания теории относительности, Госиздат, 1928, гл. 1.