§ 2. Аберрация света

Скорости, с которыми приходится иметь дело при изучении относительных движений в солнечной системе, весьма малы по сравнению со скоростью света. Но они не настолько малы, чтобы скорость света по отношению к ним можно было бы считать бесконечно большой. Иначе говоря, мы не можем пренебрегать отношениями скоростей небесных тел к скорости света. Поправки, которые приходится вследствие этого придавать к наблюденным координатам, чтобы сделать их сравнимыми с вычисленными, носят общее название поправок за аберрацию. Эти поправки бывают двух родов.

С одной стороны, направление луча света, идущего от светила к наблюдателю, меняется в зависимости от той системы отсчета, к которой относятся наблюдения. Изменения сферических координат, соответствующие такому изменению системы отсчета, называются звездной аберрацией. С другой стороны, за время, в течение которого свет доходит от светила до наблюдателя, координаты светила в системе отсчета, неизменно связанной с наблюдателем, могут заметно изменяться. Поправки, позволяющие учесть эти изменения и перейти от направления светового луча к геометрическому направлению на светило, носят название планетной аберрации. Эти поправки принимаются во внимание только для тел солнечной системы.

Звездную аберрацию приходится рассматривать двух родов: годичную и суточную. Годичная аберрация учитывает изменение направления светового луча при переходе от системы отсчета, связанной с движущейся по своей орбите Землей, к системе отсчета, связанной с Солнцем. Суточная аберрация учитывает изменение направления световых лучей при переходе от системы отсчета, связанной с точкой земной поверхности, к системе отсчета, связанной с центром Земли.

Рассмотрим инерциальную систему $S^*(x^*, y^*, z^*; t^*)$, движущуюся относительно инерциальной системы $S(x, y, z; t)$ в направлении оси x с постоянной скоростью v.

Из теории относительности известно, что эти две системы связаны между собой следующими соотношениями, носящими название уравнений Лоренца:

$$x^* = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad y^* = y, \quad z^* = z, \quad t^* = \frac{t - \beta x/c}{\sqrt{1-\beta^2}}. \qquad (2.1)$$

Через $\beta = v/c$ здесь обозначено отношение скорости v к скорости света c. Пусть наблюдатель, связанный с системой S^*, регистрирует направление луча света:

$$x^* = -ct^* \cos\psi^*; \quad y^* = -ct^* \sin\psi^*; \quad z^* = 0. \qquad (2.2)$$

В системе S этот луч будет иметь уравнения

$$x = -ct\cos\psi;\quad y = -ct\sin\psi;\quad z = 0, \tag{2.3}$$

так что угол, образуемый им с осью абсцисс, будет не $180°+\psi^*$, а $180°+\psi$. Направление луча (2.2) называется видимым, тогда как направление (2.3) относительно системы S, принимаемой за «неподвижную», называется истинным.

Подстановка выражений (2.1) в уравнения (2.2) дает

$$x - vt = -c(t - \beta x/c)\cos\psi^*,$$

$$y\sqrt{1-\beta^2} = -c(t - \beta x/c)\sin\psi^*,$$

откуда

$$x = -ct\frac{\cos\psi^* - \beta}{1 - \beta\cos\psi^*};\quad y = -ct\frac{\sqrt{1-\beta^2}\sin\psi^*}{1-\beta\cos\psi^*}.$$

Отождествление этих равенств с первыми двумя из (2.3) показывает, что

$$\cos\psi = \frac{\cos\psi^* - \beta}{1-\beta\cos\psi^*};\quad \sin\psi = \frac{\sqrt{1-\beta^2}\sin\psi^*}{1-\beta\cos\psi^*}.$$

Эти соотношения дают

$$\sin(\psi - \psi^*) = \frac{\beta - (1-\sqrt{1-\beta^2})\cos\psi^*}{1-\beta\cos\psi^*}\sin\psi^*$$

или

$$\sin(\psi - \psi^*) = \beta\sin\psi^* + \frac{1}{4}\beta^2\sin 2\psi^* + \ldots \tag{2.4}$$

Для орбитального движения Земли $v = 30$ *км/сек*, следовательно, $\beta \approx 10^{-4}$. Таким образом, при вычислении годичной аберрации учет второго члена в формуле (2.4) изменяет аберрационное смещение $\psi - \psi^*$ меньше чем на $0'',00052$. При вычислении суточной аберрации верхняя граница ошибки, которую может вызвать отбрасывание второго члена, меньше этой величины в 4500 раз.

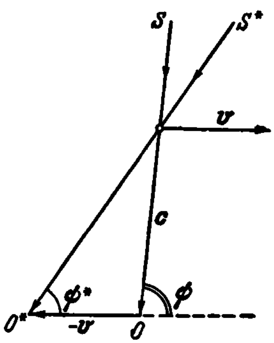

Рис. 13.

Итак, во всех случаях, встречающихся в астрономической практике, формула (2.4) может быть заменена такой:

$$\sin(\psi - \psi^*) = \beta\sin\psi^*. \tag{2.5}$$

Эта приближенная формула имеет простую и удобную для пользования интерпретацию: она эквивалентна геометрическому вычитанию скорости наблюдателя по отношению к той системе отсчета, которая принимается за «неподвижную», из скорости света (в пустоте) по отношению к этой системе отсчета, в результате чего получается вектор скорости света по отношению к системе отсчета, связанной с наблюдателем *).

В самом деле, пусть $AO = c$ есть вектор скорости света в «неподвижной» системе отсчета (рис. 13). Вычтя из него вектор $\boldsymbol{v}$, представляющий скорость наблюдателя относительно этой системы, получим вектор AO^*, представляющий скорость света в системе отсчета, связанной с наблюдателем. Треугольник AOO^* дает соотношение (2.5).

§ 3. Учет аберрации

Рассмотрим влияние звездной аберрации на экваториальные координаты светил.

Обозначим через (α, δ) сферические экваториальные координаты истинного направления AO (см. рис. 13) на светило, а через $(\alpha+\Delta\alpha, \delta+\Delta\delta)$ — координаты видимого направления O^*A. Тогда

$$\left.\begin{aligned}(c+\Delta c)\cos(\delta+\Delta\delta)\cos(\alpha+\Delta\alpha) &= c\cos\delta\cos\alpha+\dot{x},\\ (c+\Delta c)\cos(\delta+\Delta\delta)\sin(\alpha+\Delta\alpha) &= c\cos\delta\sin\alpha+\dot{y},\\ (c+\Delta c)\sin(\delta+\Delta\delta) &= c\sin\delta+\dot{z},\end{aligned}\right\} \tag{3.1}$$

где $\dot{x}$, $\dot{y}$, $\dot{z}$ — компоненты скорости наблюдателя по экваториальным осям координат. Отрезок $OA=c$ представляет скорость света в пустоте, а отрезок $O^*A=c+\Delta c$ — скорость света в движущейся системе отсчета, но измеренную при помощи единицы времени, соответствующей неподвижной системе отсчета.

Пренебрегая квадратами поправок $\Delta\alpha$, $\Delta\delta$, Δc, из соотношений (3.1) имеем

$$\begin{Vmatrix}\Delta\alpha\\ \Delta\delta\end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix}-\sec\delta\sin\alpha & +\sec\delta\cos\alpha & 0\\ -\sin\delta\cos\alpha & -\sin\delta\sin\alpha & \cos\delta\end{Vmatrix}\begin{Vmatrix}\dot{x}/c\\ \dot{y}/c\\ \dot{z}/c\end{Vmatrix}. \tag{3.2}$$

Годичная аберрация. Экваториальные гелиоцентрические координаты Земли даются формулами

$$x = -R\cos\odot;\quad y = -R\cos\varepsilon\sin\odot;\quad z = -R\sin\varepsilon\sin\odot, \tag{3.3}$$

*) Эта интерпретация приближенной формулы (2.5) формально совпадает с тем объяснением явления аберрации, которое было дано Брадлеем в 1727 г. Конечно, эту интерпретацию можно рассматривать лишь как удобное мнемоническое правило, а объяснение явления аберрации дается, как мы видели, преобразованием Лоренца (2.1).