

§ 11. Аналог зееман-эффекта в гравитационном поле вращающегося тела

В предыдущем параграфе показано, что гравитационное поле вращающегося тела отличается от поля невращающегося тела, подобно тому как в электродинамике вращающееся заряженное тело создает не только электростатическое, но и магнитное поле.

Оказывается, эта аналогия простирается еще глубже. Компоненты гравитационного поля $h_{0\alpha}$, аналогичные магнитному полю, вызывают изменение спектра излучателя, подобные эффекту Зеемана [Зельдович (1965а); см. также Скроцкий (1957)].

Ниже будет показано, что линия спектра атома с частотой ω_0 , испущенная на полюсе вращающегося тела и принятая далеким наблюдателем над полюсом, расщепляется на две компоненты с противоположной круговой поляризацией и с частотами $\omega_0 + \Omega$ и $\omega_0 - \Omega$. Величина Ω вычисляется по формуле (1.10.14).

В отличие от классического магнитного зееман-эффекта, гравитационный эффект является универсальным, т. е. расщепление линии не зависит от конкретных свойств системы, испускающей свет. Оно одинаково для атома и молекулы, и в оптическом и в радиодиапазоне.

Для доказательства рассмотрим линейный осциллятор на полюсе вращающегося тела. Аналогично маятнику Фуко, осциллятор все время колеблется в одном и том же направлении в местной инерциальной системе, т. е. в направлении, неизменном относительно местного инерциального компаса. С точки зрения наблюдателя, находящегося рядом, осциллятор испускает плоско-поляризованную волну, которую можно рассматривать как суперпозицию двух волн с равной частотой, поляризованных по кругу в разные стороны.

Но относительно далекого наблюдателя инерциальный компас прецессирует с угловой скоростью Ω (см. § 10). Следовательно, с той же скоростью поворачивается и плоскость поляризации. Линейно поляризованный свет с поворачивающейся плоскостью поляризации, очевидно, представляет собой суперпозицию двух волн, поляризованных по кругу, но с различными частотами $\omega_0 \pm \Omega$. Итак, мы показали, что свет, испущенный зарядом, колеблющимся в центральном поле сил на полюсе вращающегося тела, воспринимается далеким наблюдателем как совокупность волн с круговой поляризацией, расщепленных по частоте. Из принципа соответствия между квантовой теорией и классической механикой следует, что результат останется справедливым для любой атомной или молекулярной системы.

Альтернативное описание явления заключается в том, что право- и левополяризованные по кругу кванты испытывают различное красное смещение в поле тяготения. Таким образом,

здесь имеет место частный случай влияния момента вращения частицы (фотона) на движение частицы в гравитационном поле.

Из симметрии задачи ясно, что это различие целиком связано с вращением тела, создающего поле тяготения. Разность частот, пришедших на бесконечность право- и левополяризованных квантов, равная 2Ω , не зависит от первоначальной частоты квантов. Легко вычислить скорость, с которой растет эта разность для квантов, движущихся радиально наружу. Из уравнения (1.10.14) с $\theta = 0$ (фотон на полюсе) мы находим

$$\left| \frac{d\Omega}{dr} \right| = \frac{12}{5} \frac{GM}{c^2} \frac{R^2}{r^4} \omega_{\text{тела}}, \quad (1.11.1)$$

откуда вблизи земной поверхности

$$\left| \frac{d\Omega}{dr} \right| = \frac{12}{5} \frac{GM_{\oplus}}{c^2 R_{\oplus}^2} \omega_{\oplus} \approx 10^{-23} \text{ гц/см}. \quad (1.11.2)$$

Это изменение можно сравнить с измеренным Паундом и Ребкой красным смещением всех квантов (правых и левых) в статическом поле Земли:

$$\frac{1}{\omega} \frac{d\omega}{dr} = \frac{g}{c^2} = GM/R^2 c^2 = 10^{-18} \text{ см}^{-1}.$$

Для квантов с энергией 14 кэв , частота которых $4 \cdot 10^{18} \text{ гц}$, изменение частоты равно 4 гц/см , так что отношение первого эффекта ко второму составляет $\left| \frac{d\Omega}{dr} \right| / \left| \frac{d\omega}{dr} \right| \approx \frac{\omega_{\oplus}}{\omega} \approx 10^{-23}$ и влияние спина (круговой поляризации), жестких квантов неизмеримо малб. Для протона влияние направления спина на его вес, связанное с вращением Земли, порядка 10^{-28} веса протона.

§ 12. Гравитационное излучение

В ньютоновской теории сила тяготения сферического тела убывает как $1/r^2$. В поле тяготения можно локально измерять только относительные ускорения. Относительное ускорение (обозначенное ниже через A) двух пробных частиц в поле тяготения убывает как $1/r^3$. Это — общеизвестные приливные силы. Квадрупольная составляющая поля тяготения тела или системы несферической формы порядка $GM R^2/r^4 = GK_{\alpha\beta}/r^4$, где M — массы, разнесенные на расстояние R и создающие квадрупольный момент $K_{\alpha\beta}$. Относительные ускорения пробных частиц от этой составляющей поля порядка $A \approx GM R^2/l r^5$, где l — расстояние между пробными частицами*). Если квадрупольный момент периодически зависит

*) Очевидно, A есть тензор $\frac{d^2 l_{\alpha}}{dt^2} = A_{\alpha\beta} l_{\beta}$.