

АНАЛОГ ЗЕЕМАН-ЭФФЕКТА В ГРАВИТАЦИОННОМ ПОЛЕ  
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЗВЕЗДЫ

Я.Б.Зельдович

Как известно, в общей теории относительности (ОТО) гравитационный потенциал более не является скаляром (как это было в теории Ньютона). Гравитационное поле вращающегося тела отличается от поля покоящегося тела, подобно тому как в электродинамике вращающееся заряженное тело создает не только электростатическое, но и магнитное поле. Тирринг и Лензе заметили, что идеальный гироскоп вблизи вращающегося тела медленно поворачивается по отношению к инерциальной системе на бесконечности, т.е. поворачивается по отношению к далеким неподвижным звездам. По порядку величины скорость  $\Omega$  поворота гироскопа на поверхности тела равна

$$\Omega \approx \omega R_g / R,$$

где  $\omega$  - скорость вращения тела,  $R$  - его радиус,  $R_g$  - гравитационный радиус. На полюсе Земли  $\Omega$  равно  $0,1$  угловой секунды в год ( $5 \cdot 10^{-7}$  радиан/год =  $1,6 \cdot 10^{-14}$  рад/сек); наблюдение этого эффекта явилось бы важной проверкой ОТО. Поворот плоскости поляризации света рассматривал Скроцкий [1].

В предлагаемой заметке рассматривается влияние изменения гравитационного поля, создаваемого вращением, на спектр, излучаемый атомами на поверхности тела и наблюдаемый приемником, находящимся вдали от тела.

Компоненты гравитационного поля, аналогичные магнитному полю, вызывают изменения спектра, подобные эффекту Зеемана.

Линия, испущенная атомом с частотой  $\omega_0$  на полюсе и принятая далеким наблюдателем над полюсом, расщепляется на две компоненты с противоположной круговой поляризацией и с частотами  $\omega_0 + \Omega$  и  $\omega_0 - \Omega$ .

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

Для доказательства рассмотрим линейный осциллятор на полюсе. Можно представить себе, что он скреплен с идеальным гироскопом 1) и в центральном поле сил все время колеблется в плоскости, в которой лежит ось гироскопа. С точки зрения наблюдателя, находящегося на полюсе, осциллятор испус-

кает плоскополяризованную волну, которую можно рассматривать как суперпозицию двух волн, поляризованных по кругу в разные стороны с равной частотой.

Но относительно далекого наблюдателя ось гироскопа поворачивается со скоростью  $\Omega$ . 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 доказали, что свет, испущенный зарядом, колеблющимся в центральном поле сил на полюсе вращающегося тела, воспринимается далеким наблюдателем как совокупность лучей с круговой поляризацией, расщепленных по частоте. В силу принципа соответствия между квантовой теорией и классической механикой очевидно, что этот результат останется справедливым для любой атомной или молекулярной системы. На поверхности нейтронной звезды эффект в принципе может достичь наблюдаемой величины. В самом деле, при массе порядка  $M_\odot$  радиус звезды порядка 10 км; максимальная скорость вращения звезды  $\omega$ , соответствующая параболической скорости на экваторе, порядка  $\sim 10^4$  сек<sup>-1</sup>. При этом (с учетом распределения плотности) достигается  $\Omega \sim 10^2$  сек<sup>-1</sup>. Для радиолинии 21 см,  $\omega_0 = 10^{10}$  сек<sup>-1</sup> такое расщепление ( $10^{10} \pm 10^2$ ) могло бы быть наблюдеено при современной точности. Однако, в действительности наблюдение, вероятно, безнадежно, так как поверхность нейтронной звезды ничтожна и соответственно ничтожна мощность излучения в длинноволновом диапазоне; существуют другие при-

чины уширения и смещения линий; на полюсе и на экваторе эффект имеет разные знаки.

Независимо от эксперимента, принципиальные соображения о существовании гравитационного зееман-эффекта могут быть интересны с точки зрения углубления аналогии между магнитным полем и соответствующими членами в релятивистской теории тяготения. На эту аналогию независимо обратил внимание Смородинский, рассматривающий в ОТГ вектор, играющий роль потенциала; ротор этого вектора определяет локальное вращение инерциальной 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 (кванта) на движение частицы в гравитационном поле.

Из симметрии задачи ясно, что это различие целиком связано с вращением тела, создающего поле тяготения.

Изменение частоты кванта, равное  $\Omega$ , не зависит от частоты кванта  $\omega_0$  и происходит в основном на пути порядка  $1/2$  или  $1/3$  радиуса тела; на Земле оно составляет примерно  $2,5 \cdot 10^{-15}$  гц на  $2+3 \cdot 10^8$  см, т.е.  $10^{-23}$  гц/см. Это изменение можно сравнить с измеренным Паундом и Ребкой красным смещением всех квантов (правых и левых) в основном статическом поле Земли:

$$\frac{1}{\omega} \frac{d\omega}{dx} = \frac{g}{c^2} = 10^{-18} \text{ см}^{-1}.$$

Для квантов с энергией 14 кэв, частота которых  $4 \cdot 10^{18}$  гц, изменение частоты равно 4 гц/см и влияние спина (круговой поляризации) жестких квантов неизмеримо мало. Для протона влияние направления спина на его вес, связанное с вращением Земли, порядка  $10^{-28}$  веса протона.

Поступило в редакцию

1 апреля 1965 г.

#### Литература

[1] Г.В.Скроцкий. ДАН, 114, 73, 1957.

- 
- 1) Ось гироскопа лежит в горизонтальной плоскости и перпендикулярна линии центр тела - полюс - наблюдатель, т.е. направлению луча.