

ной, к-рая не изменяется с течением времени. Космологич. постоянную можно рассматривать как величину, описывающую плотность энергии и давление (или натяжение) вакуума, или т. н. вакуумоподобного состояния, характеризующего ур-ние состояния (17). Согласно данным космологии, в сегодняшней Вселенной Λ либо равна нулю, либо чрезвычайно мала: $|\Lambda| < 10^{-55} \text{ см}^{-2}$. Однако, согласно теории ранней Вселенной, в самом начале космологич. расширения, вероятно, Λ была очень большой, гравитация вакуумоподобного состояния определяла динамику расширения Вселенной (см. *Раздувающаяся Вселенная*).

Внешне ур-ния (14) подобны ур-нию (3) для ньютонова потенциала. В обоих случаях слева стоят величины, характеризующие поля, а справа — величины, характеризующие материю, создающую поле. Однако ур-ния (14) имеют ряд свойств, особенностей. Ур-ние (3) линейно и поэтому удовлетворяет принципу суперпозиции. Оно позволяет вычислить гравитац. потенциал ϕ для любого распределения произвольно движущихся масс. Ньютоново поле T не зависит от движения масс, поэтому ур-ние (3) само не определяет непосредственно их движение. Движение масс определяется из второго закона механики Ньютона. Иная ситуация в теории Эйнштейна. Ур-ния (14) нелинейны, не удовлетворяют принципу суперпозиции. В теории Эйнштейна нельзя произвольным образом задать правую часть ур-ний ($T_{\mu\nu}$), зависящую от движения материи, а затем вычислить гравитац. поле $g_{\mu\nu}$. Решение ур-ний Эйнштейна приводит к совместному определению и движения материи, создающей поле, и к вычислению самого поля. Существенно при этом, что ур-ния поля T содержат в себе и ур-ния движения масс в поле T . С физ. точки зрения это соответствует тому, что в теории Эйнштейна материя создаёт искривление пространства-времени, а это искривление, в свою очередь, влияет на движение материи, создающей искривление. Математически этот факт выражается в том, что ковариантная производная левой части ур-ний Эйнштейна тождественно равна нулю. Из ур-ний (14) тогда следует

$$(T^{\nu}_{\nu})_{;\nu} = 0 \quad (18)$$

(; — знак ковариантного дифференцирования). Ур-ния (18) непосредственно являются ур-ниями движения материи с учётом T . Так, для случая тензора энергии-импульса (16) в лагранжевых координатах ур-ния (18) переписываются в виде

$$d\mathcal{E} + PdV = 0, \quad (19)$$

$$\frac{\partial P}{\partial x^i} - \frac{g_{0i}}{g_{00}} \frac{\partial P}{\partial x^0} (\varepsilon + P) \frac{F_i}{c^2} = 0. \quad (20)$$

Здесь \mathcal{E} — энергия объёма V элемента вещества; $\mathcal{E} = \varepsilon V$. Ур-ние (19) описывает изменение энергии за счёт работы сил давления, ур-ние (20) определяет в лагранжевых координатах сохранение импульса вещества. Ур-ния движения тел (10) во внеш. поле T также являются следствием ур-ний (18).

В случае слабых гравитац. полей метрика пространства-времени мало отличается от евклидовой и ур-ния Эйнштейна приближённо переходят в ур-ния (3) и (5) теории Ньютона (если рассматриваются движения, медленные по сравнению со скоростью света, и расстояния от источника поля много меньше, чем $\lambda = ct$, где t — характерное время изменения положения тел в источнике поля). В этом случае ньютонов потенциал

$$\phi = \frac{c^2}{2} (g_{00} - 1). \quad (21)$$

В слабых полях можно ограничиться вычислением малых поправок к ур-ниям Ньютона. Эффекты, соответствующие этим поправкам, позволяют экспериментально проверить теорию Эйнштейна (см. ниже). Поле вращающейся массы в теории Эйнштейна отличается от поля невращающейся массы дополнительными, т. н. гравимагнитными силами, к-рые действуют на движущиеся тела. Напряжён-

ность гравимагн. поля H на расстоянии r от массы, имеющей угл. момент g , составляет по порядку величины

$$H \approx Gg/cr^3. \quad (22)$$

Это поле вызывает ускорение тела, движущегося со скоростью, малой по сравнению с c , равное $F = Gg/cr^3$. Особенно существенны эффекты теории Эйнштейна в сильных гравитац. полях.

Некоторые выводы теории тяготения Эйнштейна

Ряд выводов теории Эйнштейна качественно отличается от выводов ньютоновой теории T . Важнейшие из них связаны с возникновением чёрных дыр, сингулярности пространства-времени (мест, где формально, согласно теории, обрывается существование частиц и полей в обычной, известной нам форме) и существованием *гравитационных волн*.

Чёрные дыры. Решение ур-ний Эйнштейна (10) в пустоте ($T_{\mu\nu} = 0$) в случае изолированного сферически-симметричного источника поля массой M записывается в виде (решение Шварцшильда)

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2). \quad (23)$$

Величина ускорения свободного падения F [см. (13)] для поля (23) имеет вид

$$F = \frac{GM}{r^2 \sqrt{1 - 2GM/c^2 r}}. \quad (24)$$

Это выражение отличается от ньютонова корнем в знаменателе. Величина F стремится к бесконечности, когда r стремится к $r_g = 2GM/c^2$. Величина r_g наз. *гравитационным радиусом*. Сфера радиусом r_g наз. сферой Шварцшильда. Вторая космич. скорость в теории Ньютона даётся выражением

$$V_2 = \sqrt{2GM/r}. \quad (25)$$

Следовательно, при $r = r_g$ величина V_2 становится равной скорости света. Если сферич. тело массой m сожмётся до размеров, меньших r_g , то свет не сможет выйти из-под сферы Шварцшильда. Такие объекты получили название чёрных дыр. Из чёрных дыр к внеш. наблюдателю не поступает никакой информации.

При сжатии вращающегося тела вывод о возникновении чёрной дыры сохраняется, но поле T вокруг неё отличается от выражения (23) наличием гравимагн. сил (см. *Чёрные дыры*). В этом случае линейные размеры области, из к-рой не может выходить информация (ограничивающая её поверхность наз. горизонтом событий), зависят от угл. момента вращающегося сжимающегося тела, но по порядку величины они равны r_g .

Внутри горизонта событий в чёрной дыре никакие силы не могут удержать тело от дальнейшего сжатия. Процесс сжатия наз. *гравитационным коллапсом*. При этом растёт поле T . — увеличивается искривлённость пространства-времени. Доказано, что в результате гравитац. коллапса неизбежно возникает сингулярность пространства-времени, связанная, по-видимому, с возникновением его бесконечной искривлённости. (Об ограничении применимости теории Эйнштейна в таких условиях см. след. раздел.) Теоретич. астрофизика предсказывает возникновение чёрных дыр в конце эволюции массивных звёзд; возможно существование во Вселенной чёрных дыр и др. происхождения. Чёрные дыры, по-видимому, открыты в составе некоторых двойных звёздных систем.

Гравитационные волны. Теория Эйнштейна предсказывает, что тела, движущиеся с переменным ускорением, будут излучать гравитац. волны. Гравитац. волны являются распространяющимися со скоростью света перем. полями приливных гравитац. сил.