

Приложения

Приложение 1. Вывод формулы (9.8)

Для преобразования формулы (9.7) для случая слабого гравитационного поля были введены следующие приближенные значения компонент метрического тензора:

$$q_{11}=q_{22}=q_{33}=1+p; \quad q_{44}=-c^2(1+q); \quad g_{\alpha\beta}=r_{\alpha\beta} \quad \text{при } \alpha \neq \beta ,$$

где p , q и $r_{\alpha\beta}$ малы по сравнению с единицей. Подставим эти значения компонент метрического тензора в формулу (9.7):

$$E = \frac{mc}{-i} (q_{44}dx_4 + q_{34}dx_3 + q_{24}dx_2 + q_{14}dx_1) \left(\sum_{a,b} q_{a,b} dx_a dx_b \right)^{-1/2} \quad (\text{П.1})$$

Преобразуем числитель:

$$\begin{aligned} & q_{44}dx_4 + q_{34}dx_3 + q_{24}dx_2 + q_{14}dx_1 = \\ & = -c^2(1+q)dt + r_{34}dx_3 + r_{24}dx_2 + r_{14}dx_1 = \\ & = -c^2 dt \left(1 + q - \frac{r_{14}}{c^2} u_x - \frac{r_{24}}{c^2} u_y - \frac{r_{34}}{c^2} u_z \right) \end{aligned}$$

Преобразуем знаменатель:

$$\begin{aligned} & \left(\sum_{a,b} q_{a,b} dx_a dx_b \right)^{1/2} = (q_{11}dx_1^2 + q_{22}dx_2^2 + q_{33}dx_3^2 + q_{44}dx_4^2 + \\ & + 2q_{12}dx_1dx_2 + 2q_{13}dx_1dx_3 + 2q_{14}dx_1dx_4 + 2q_{23}dx_2dx_3 + \\ & + 2q_{24}dx_2dx_4 + 2q_{34}dx_3dx_4) = \\ & = (1+p)dx_1^2 + (1+p)dx_2^2 + (1+p)dx_3^2 - \\ & - c^2(1+q)dx_4^2 + 2r_{12}dx_1dx_2 + 2r_{13}dx_1dx_3 + 2r_{14}dx_1dx_4 + 2r_{23}dx_2dx_3 + \\ & + 2r_{24}dx_2dx_4 + 2r_{34}dx_3dx_4 \end{aligned}$$

Так как $cdx_4 = cdt$, $c^2dx_4^2 = c^2dt^2$, то вынесем из-под корня $(-c^2dt^2)^{1/2} = icdt$ и сократим числитель и знаменатель на общий множитель cdt . Далее разделим все члены на $-c^2dt^2$.

$$= \left((1+q) - \frac{1+p}{c^2} \cdot \frac{dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2}{dt^2} - 2r_{i,k} \frac{dx_i dx_k}{c^2 dt^2} \right)^{1/2} =$$

$$= \left(\begin{array}{l} (1+q) - \frac{u^2}{c^2}(1+p) - 2r_{12} \frac{u_x u_y}{c^2} - 2r_{13} \frac{u_x u_z}{c^2} - 2r_{14} \frac{u_x}{c^2} - 2r_{23} \frac{u_y u_z}{c^2} - \\ - 2r_{24} \frac{u_y}{c^2} - 2r_{34} \frac{u_z}{c^2} \end{array} \right)^{1/2}$$

$$i \neq k = 1, 2, 3, 4; dx_i = dt$$

Составляя исходную формулу, получаем (9.8).

Приложение 2. Краткий толковый словарь терминов, встречающихся в данном пособии

Абсолютная величина - физическая величина, имеющая одно и то же значение в любой системе отсчета (инвариант - синоним). Например, длина в классической механике - абсолютная величина, скорость света в специальной теории относительности - инвариант.

Абсолютная система отсчета - избранная система отсчета, относительно которой движение и покой имели бы абсолютный характер. Такая система отсчета предполагалась существующей в механике Ньютона, ее представляли в виде “ящика”, вместившего всего мира. Такую систему отсчета пытались связать с эфиром. В СТО А. Эйнштейн показал, что абсолютной СО не существует, все СО, движущиеся относительно друг друга равномерно и прямолинейно - инерциальные системы отсчета - равноправны. Эйнштейну не потребовался эфир, так как он признал за электромагнитным полем физическую реальность, материальную среду, для существования которой не нужна промежуточная среда вроде эфира.

Близкодействие - принцип современной физики, считающей, что не существует материального процесса, скорость распространения которого превышает скорость света в вакууме. Согласно принципу близкодействия взаимодействие (информация) передается от точки к точке с конечной скоростью.

Близнецов парадокс - эффект, объясняемый в ОТО фактическим, а не относительным, как в СТО, различием хода

часов в неинерциальных системах отсчета. Суть парадокса состоит в том, что один из близнецов остается на Земле (ИСО), другой же улетает на космическом корабле (НСО) и по возвращении домой не застаёт одногодок, так как (в зависимости от величины ускорения ракеты) на Земле пройдет десятки (сотни) лет, в то время как на корабле пройдет лишь несколько лет.

Величина относительная - величина, численное значение которой зависит от выбора СО. Например, относительной величиной является координата события, или скорость движения объекта.

Волны гравитационные - процесс распространения возмущения, возникающего в пространстве-времени из-за нарушения стационарного состояния небесных тел. Например, гравитационные волны должны возникать при взрыве звезд в результате нарушения равновесия сил гравитационного сжатия и сил, связанных со световым давлением. До сих пор гравитационные волны экспериментально не обнаружены.

Геодезическая линия - кратчайшая траектория, соответствующая свойствам геометрии пространства - времени. В евклидовой геометрии - это прямая линия. В неевклидовой геометрии вид геодезической кривой зависит от свойств данной геометрии, которые, в свою очередь, зависят от материальных тел, заполняющих пространство-время.

Гравитационный радиус - радиус сферы, на поверхности которой сила тяготения, созданная массами, лежащими внутри этой сферы, стремится к бесконечности. Если звезда под действием гравитационных сил сожмется до размеров, меньших ее гравитационного радиуса, то никакая информация - сигнал не сможет преодолеть поле тяготения такой сжавшейся (сколлапсировавшей) звезды. Поэтому такой объект Вселенной получил название "черная дыра".

Горизонт мира - расстояние до самых удаленных звезд, от которых воспринимается сигнал (видимого или рентгеновского диапазона). Принимается, что это расстояние порядка 10-15 млрд. световых лет (1 световая секунда - это расстояние, которое свет проходит за 1 секунду, оно равно 300000 км.).

Гравитационный коллапс - катастрофическое сжатие звезды под действием сил тяготения. Этот процесс может наступить тогда, когда выгорает “звездное горючее” и световое давление не может уравновешивать силы тяготения.

Гравитон - гипотетическая частица, сопоставляемая в квантовой теории гравитации возмущенному состоянию гравитационного поля.

Дальнодействие - основное представление (принцип) классической механики, утверждающее, что действие (информация) может передаваться на любое расстояние мгновенно. С этим утверждением согласуется классическая теорема сложения скоростей, из которой следует существование бесконечной скорости.

Доплера эффект - изменение воспринимаемой частоты колебаний звуковых и электромагнитных волн при относительном движении источника и приемника волн. Оптический Доплера эффект позволил установить, что Вселенная в видимой ее части расширяется.

Инерциальная система отсчета (ИСО) - система отсчета, в которой выполняется закон инерции: свободное тело или покоится, или движется равномерно и прямолинейно. Таких СО существует бесчисленное множество, они движутся относительно друг друга равномерно и прямолинейно. Все ИСО равноправны и выбор одной из них обусловлен лишь физической необходимостью и простотой математических расчетов.

Инвариантность - сохранение (неизменность) вида формулы (или численного значения физической величины) при преобразовании координат и времени. В классической механике формула 2-го закона Ньютона (а следовательно, ускорение, масса, сила) инвариантна относительно формул преобразования координат и времени Галилея; в СТО инвариантность проявляется относительно формул преобразования координат и времени Лоренца.

В СТО инвариантными являются все 4-х векторы (интервал, 4-х вектор скорости, 4-х вектор энергии-импульса и т.д.).

Интервал - новая абсолютная (инвариантная) величина, введенная в СТО взамен по отдельности относительных длины и времени. Немецкий математик Риман (XIX в.) показал, что интервал полностью отражает все свойства геометрии пространства-времени.

Космология - физическое учение о строении и происхождении Вселенной.

Красное смещение - один из эффектов, предсказанных ОТО. Оно обусловлено свойствами неевклидова пространства-времени, с влияниями на эти свойства гравитирующих тел. При выходе электромагнитных волн из сильного гравитационного поля частота волн уменьшается. Первопричиной красного смещения является замедление хода часов (периодических процессов), в сильном гравитационном поле, частота же периодических процессов обратно пропорциональна периоду колебаний.

Коллапс звезды - см. Гравитационный радиус.

Метрический тензор - совокупность величин, определяющих геометрические свойства пространства-времени. Его компоненты определяются как расположением, так и величиной, и движением тяготеющих масс.

Мёсбауэра эффект - испускание или поглощение гамма-квантов атомными ядрами, расположенными в узлах кристаллической решетки твердого тела. Это излучение не сопровождается изменением внутренней энергии тела и спектральные линии излучения имеют очень малую естественную ширину.

Неинерциальная система отсчета (НСО) - СО, в которой помимо сил ньютоновской природы, обусловленных взаимодействием тел, вводятся силы инерции, обусловленные ускоренным движением СО, или локально эквивалентными им гравитационные силы.

Однородность и изотропность пространства - равноценность всех точек и всех направлений пространства.

Однородность времени - равноценность всех моментов времени, которые можно принять за начало отсчета времени.

Принцип относительности - один из постулатов СТО, утверждающий, что во всех ИСО действуют одни и те же законы природы.

Принцип эквивалентности - в ОТО этот принцип утверждает, что физически невозможно отличить ИСО, покоящуюся в гравитационном поле, от ИСО, движущейся с соответствующим ускорением вне гравитационного поля. В общем случае гравитационное поле и ускоренное движение могут быть сложной конфигурации и временной зависимости.

Система отсчета - в современной физике - это физическая лаборатория со всеми необходимыми приборами, используемыми при изучении физических процессов. В понятие СО обязательно входят такие элементы, как тело отсчета, система координат, масштабы и часы.

Световой год - единица измерения расстояния, равная пути, проходимому светом за один год. Он равен $9,46 \cdot 10^{12}$ км.