Как известно, физические законы относительно Σ_1 не отличаются от законов, отнесенных к Σ_2; это связано с тем, что в гравитационном поле все тела ускоряются одинаково. Поэтому при современном состоянии наших знаний нет никаких оснований полагать, что системы отсчета Σ_1 и Σ_2 в каком-либо отношении отличаются друг от друга, и в дальнейшем мы будем предполагать полную физическую равноценность гравитационного поля и соответствующего ускорения системы отсчета.

Это предположение распространяет принцип относительности на случай равномерно ускоренного прямолинейного движения системы отсчета. Эвристическая ценность этого предположения состоит в том, что оно позволяет заменить однородное поле тяжести равномерно ускоренной системой отсчета, которая до известной степени поддается теоретическому рассмотрению.

§ 18. Пространство и время в равномерно ускоренной системе отсчета

Рассмотрим сначала тело, отдельные материальные точки которого в некоторый определенный момент времени t в неускоренной системе отсчета S покоятся относительно S, но обладают определенным ускорением. Как влияет это ускорение γ на форму тела в системе отсчета S?

Если подобное влияние существует, оно будет заключаться либо в равномерном изменении размеров в направлении ускорения, либо же в двух перпендикулярных ускорению направлениях, ибо другие результаты исключаются по соображениям симметрии. Каждое обусловленное ускорением сокращение (если оно вообще существует) должно быть четной функцией γ; следовательно, им можно пренебречь, если ограничиться случаем, когда γ так мало, что можно отбросить члены второй и более высоких степеней по γ. Поскольку в дальнейшем мы ограничимся этим случаем, влияние ускорения на размеры тела можно не учитывать.

Рассмотрим теперь систему отсчета Σ, равномерно ускоренную относительно неускоренной системы отсчета S в направлении оси X последней. Пусть часы или масштаб в системе отсчета Σ в покое идентичны часам или масштабу в S. Предположим, что начало координат системы отсчета Σ движется вдоль оси X системы отсчета S, а оси Σ параллельны осям S. В каждый момент времени существует неускорен-

ная система отсчета S', координатные оси которой в рассматриваемый момент (в определенный момент времени t' в S') совпадают с координатными осями системы отсчета Σ. Если точечное событие, происходящее в этот момент времени t', имеет в Σ координаты ξ, η, ζ, то

$$x' = \xi, \quad y' = \eta, \quad z' = \zeta,$$

поскольку, согласно сказанному выше, можно не учитывать влияние ускорения на размеры тела, применяемого для измерения ξ, η, ζ. Представим себе далее, что часы в Σ в момент времени t' в S' идут так, что показывают в этот момент t'. Как будут идти часы в следующий промежуток времени τ?

Прежде всего следует учесть, что специфическое влияние *ускорения* на ход часов Σ можно не принимать во внимание, так как оно должно быть порядка γ^2. Далее, поскольку влиянием скорости, приобретенной за время τ, на ход часов можно пренебречь и поскольку путь, пройденный относительно S' часами за время τ, по порядку величины равен τ^2, и, таким образом, им можно тоже пренебречь, показания часов в Σ за элемент времени τ полностью совпадают с показаниями часов в S'.

Отсюда следует, что свет в вакууме распространяется относительно Σ в течение элемента времени τ с универсальной скоростью c, если мы определим одновременность в системе отсчета S', мгновенно покоящейся относительно Σ, и если мы будем применять для измерения времени и координат соответственно часы и масштабы, эквивалентные тем, которые применяются для измерения времени и пространства в неускоренных системах. Таким образом, и в этом случае для определения понятия одновременности можно применять принцип постоянства скорости света, если ограничиться очень малыми световыми путями.

Теперь представим себе, что часы в Σ поставлены указанным образом в тот момент $t = 0$ в S, когда Σ мгновенно покоится относительно S. Совокупность показаний поставленных таким образом часов мы будем называть «местным временем» σ системы отсчета Σ. Физический смысл местного времени, как это непосредственно видно, заключается в следующем. Если для измерения времени процессов, происходящих в отдельных элементах пространства Σ, применять местное время σ, то законы, которым подчиняются эти процессы, не могут зависеть от положения рассматриваемого элемента объема, т. е. от его координат,

при условии, что в разных элементах объема применяются не только одинаковые часы, но и одинаковые масштабы.

Напротив, местное время σ непосредственно нельзя считать «временем» системы отсчета Σ, и именно по той причине, что два точечных события, происходящие в разных точках Σ, в смысле нашего определения неодновременны, когда их местные времена равны. Если какие-либо двое часов в Σ в момент $t = 0$ синхронны относительно S и совершают указанные движения, то они всегда остаются синхронными относительно S. Но в соответствии с § 4 эти часы не будут синхронными относительно системы отсчета S', мгновенно покоящейся относительно Σ, но движущейся относительно S, и, следовательно, по нашему определению, они не будут синхронными относительно Σ.

Определим теперь «время» τ системы отсчета Σ как совокупность тех показаний часов, находящихся в начале координат системы отсчета Σ, которые в смысле нашего определения являются одновременными с рассматриваемыми событиями[1].

Найдем теперь соотношение между временем τ и местным временем σ точечного события. Из первого уравнения (1) следует, что два события одновременны относительно S', а следовательно, и относительно Σ, при условии

$$t_1 - \frac{v}{c^2}x_1 = t_2 - \frac{v}{c^2}x_2,$$

причем индексы указывают на принадлежность к тому или другому точечному событию. Ограничимся сначала рассмотрением таких коротких промежутков времени[2], что можно отбросить все члены, содержащие вторую или более высокие степени τ или v; тогда с учетом (1) и (29) следует положить (см. примечание редактора на стр. 135. — *Ред.*)

$$x_2 - x_1 = x_2' - x_1' = \xi_2 - \xi_1,$$
$$t_1 = \sigma_1, \quad t_2 = \sigma_2,$$
$$v = \gamma t = \gamma\tau,$$

так что из написанного выше соотношения получается

$$\sigma_2 - \sigma_1 = \frac{\gamma\dot{\tau}}{c^2}(\xi_2 - \xi_1).$$

[1]Таким образом, символ τ применяется здесь в другом смысле, чем было выше.

[2]Тем самым, согласно уравнению (1), предполагается также известное ограничение значений $\xi = x'$.

Помещая первое точечное событие в начало координат, так что $\sigma_1 = \tau$ и $\xi_1 = 0$, и опуская индекс для второго точечного события, получаем

$$\sigma = \tau\left(1 + \frac{\gamma\xi}{c^2}\right). \tag{30}$$

Это соотношение выполняется, прежде всего, если τ и ξ меньше определенных пределов. Оно, очевидно, выполняется и для произвольного τ, если ускорение γ постоянно относительно системы отсчета Σ, так как в этом случае соотношение между σ и τ должно быть линейным. Для произвольных ξ соотношение (30) не выполняется. Из того, что выбор начала координат не должен влиять на это соотношение, можно заключить, что оно должно быть заменено точным соотношением

$$\sigma = \tau e^{\gamma\xi/c^2}.$$

Однако мы будем придерживаться формулы (30). В соответствии с § 17 формула (30) применима также в системе координат, в которой действует однородное гравитационное поле. В этом случае мы должны положить $\Phi = \gamma\xi$, причем Φ означает потенциал силы тяжести; в результате получим

$$\sigma = \tau\left(1 + \frac{\Phi}{c^2}\right). \tag{30a}$$

Мы определили время в системе отсчета Σ двояко. Какое из этих определений следует применять в различных случаях? Предположим, что в двух местах с различными гравитационными потенциалами ($\gamma\xi$) находятся физические системы, и мы хотим сравнивать их свойства. Здесь, по-видимому, наиболее естественно поступить следующим образом. Отправимся сначала с нашими измерительными приборами в первую физическую систему и проведем там измерения; после этого направимся вместе со всеми измерительными приборами во вторую систему, чтобы произвести в ней такие же измерения. Если измерения в этих системах дадут одинаковые результаты, мы будем называть обе физические системы «одинаковыми». Среди названных измерительных приборов имеются часы, которыми мы измеряем местные времена σ. Поэтому вполне естественно для определения физических величин в областях, в которых существует поле тяжести, использовать время σ.

Если же речь идет о явлении, в котором необходимо одновременно рассматривать тела, находящиеся в областях с разными гравитационными потенциалами, то в выражениях, в которые время входит явно

(т.е. не только посредством других физических величин), мы должны использовать время τ: иначе одновременность двух событий не выражалась бы равенством значений времени обоих событий. Поскольку же при определении времени τ используются моменты времени по часам, находящимся в некотором произвольно выбранном месте, то при пользовании временем τ законы природы могут зависеть от координат.

§ 19. Влияние гравитационного поля на часы

Если в точке P с гравитационным потенциалом Φ находятся часы, показывающие местное время, то, согласно соотношению (30а), их показания в $(1 + \Phi/c^2)$ раз больше, чем τ, т.е. они идут в $(1 + \Phi/c^2)$ раз быстрее одинаковых с ними часов, находящихся в начале координат. Пусть показания обоих этих часов воспринимаются каким-нибудь способом, например, оптическим путем, наблюдателем, находящимся где-то в пространстве. Поскольку время $\Delta\tau$, проходящее между показанием часов и моментом, когда это показание будет воспринято наблюдателем, находящимся где-то в пространстве, не зависит от τ, то часы в точке P' идут в $(1+\Phi/c^2)$ раз быстрее, чем часы в начале координат. В этом смысле можно сказать, что процесс, происходящий в часах, — и вообще любой физический процесс — протекает тем быстрее, чем больше гравитационный потенциал в области, где разыгрывается этот процесс.

Существуют «часы», находящиеся в местах с различными гравитационными потенциалами, скорость «хода» которых можно проконтролировать с большой точностью; это — источники света с линейчатым спектром. Из сказанного выше следует[1], что свет, приходящий от такого источника, расположенного на поверхности Солнца, обладает длиной волны, приблизительно на две миллионных доли большей, чем свет, испускаемый теми же атомами на Земле.

§ 20. Влияние тяготения на электромагнитные процессы

Если мы будем относить электромагнитный процесс в некоторый момент времени к неускоренной системе отсчета S', мгновенно покоя-

[1] В предположении, что соотношение (30а) выполняется также в неоднородном гравитационном поле.