

где  $M$  и  $R$  — масса и радиус Земли,  $H$  — высота над земной поверхностью. Считая  $H \ll R$  и принимая во внимание, что ускорение свободного падения в поле тяжести определяется формулой  $g = \frac{\gamma M}{R^2}$ , легко получим

$$\frac{\delta\lambda}{\lambda} = \frac{gH}{c^2}. \quad (6,7,7)$$

В опытах Крэншоу, Шиффера и Уайтхеда при высоте 12,5 м относительное смещение, вычисленное по формуле (6,7,7), составило  $1,36 \cdot 10^{-15}$ . Измеренное смещение оказалось равным приблизительно  $1,30 \cdot 10^{-15}$ , что отлично согласуется с указанным теоретическим значением.

**8. Общая теория относительности и система Коперника.** После разработки Ньютоном основ небесной механики динамический смысл учения Коперника представлялся совершенно ясным, и истинность этого учения не вызывала сомнений. С точки зрения механики Ньютона, гелиоцентризм Солнечной системы состоит в том, что центр массы ее, практически совпадающий с центром Солнца, движется прямолинейно и равномерно. Согласно принципу относительности Галилея, прямолинейное и равномерное перемещение Солнечной системы в целом не влияет на наблюдаемые внутренние движения, тогда как ускоренное движение возбуждало бы силы инерции, которые могут нарушить законы динамики в обычной форме и изменить движение планет и других членов Солнечной системы. Иными словами, при относительности скоростей ускорения имеют в механике Ньютона абсолютный характер.

Таким образом, с ньютоновой точки зрения, основное положение учения Коперника состоит в утверждении, что центр массы Солнечной системы (практически центр Солнца) обладает нулевым ускорением, хотя его постоянная скорость может быть сколь угодно большой. С появлением ОТО эта простая концепция оказалась неудовлетворительной. Многие авторы, основываясь на условии общей ковариантности, высказывали тезис о равноправности систем Коперника и Птолемея. Различие между этими системами объявлялось условным, не имеющим объективного значения и зависящим лишь от субъективных склонностей исследователя.

Следует отметить, что сторонники указанного тезиса отождествляют различие между учениями Коперника и Птолемея с различием между гелио- и геоцентрическими координатами. Такое отождествление и приводит к выводу об эквивалентности этих учений с точки зрения ОТО. Поскольку уравнения ОТО отвечают условию ковариантности, исследователь может пользоваться гелио- и геоцентрическими координатами, выбирая их по своему усмотрению.

В действительности различие между системами Коперника и Птолемея имеет более глубокий физический смысл, чем различие между соответствующими координатами как способами изучения движения небесных тел. В астрономии успешно пользуются различными координатами, в том числе геоцентрическими. Преобразование гелиоцентрических координат в геоцентрические, весьма часто осуществляется в астрономии, не означает, конечно, отказа от учения Коперника и возврата к учению Птолемея. Обе системы координат одинаково пригодны для изображения движений и как способы исследования они принципиально равноправны. Однако одна из этих систем координат обладает некоторой *материально обусловленной привилегированностью*, определяющей ее предпочтительность. с астрономической точки зрения.

Рассматривая Солнечную систему в отрыве от других космических тел, можно у довлетворительно обосновать главный тезис гелиоцентризма только в том случае, если постулировать существование инерциальных координат, т. е. систем отсчета, в которых выполняются законы динамики Ньютона. В каждой из таких систем отсчета центр массы Солнечной системы движется равномерно и прямолинейно, тогда как планеты имеют значительное ускорение. Однако постулат об инерциальных координатах, не связанных так или иначе с материальными телами, оправдан только в ньютоновой концепции абсолютного пространства. Отказываясь от этой концепции, приходится отвергнуть и постулат об инерциальных координатах, существующих независимо от материальных тел. При этом понятие абсолютного ускорения утрачивается, и потому обычное доказательство гелиоцентризма теряет силу. Для преодоления этой трудности необходимо обосновать понятие инерциальной системы отсчета, не прибегая к ньютоновой концепции абсолютного пространства.

Применение ОТО связано с такой же трудностью. С интересующей нас точки зрения, ОТО не имеет преимущества по сравнению с механикой Ньютона, поскольку эта теория уточняет движение тел Солнечной системы лишь в деталях, непосредственно не относящихся к различию между гелио- и геоцентрическим учениями. Уравнения поля ОТО построены таким образом, что в первомближении, которое только и представляет интерес для обоснования гелиоцентризма, они обеспечивают переход к механике Ньютона.

Гелиоцентризм представляет собой механическую особенность определенной системы небесных тел. Поэтому при его обосновании необходимо учитывать физическую сущность *механического движения*, т. е. перемещения одного тела по отношению к другим. Можно сказать, что в механическом движении проявляются пространственно-временные отношения между телами. *Отдельное тело*, рассмат-

риваемое независимо от других тел природы, не находится ни в покое, ни в движении, поскольку оно может покояться или двигаться только по отношению к чему-либо внешнему. В изолированной системе тел, рассматриваемой в отрыве от внешних космических масс, происходит только внутреннее движение. В случае системы двух тел утверждения «*A* покоятся, *B* движется», «*A* движется, *B* покоятся», «*A* и *B* обращаются вокруг их неподвижного центра масс» приобретают физический смысл лишь в том случае, если система относится к каким-либо внешним телам. Так, отношение системы Земля — Луна к Солнцу определяет физический смысл утверждения о том, что каждое из двух указанных тел обращается вокруг их общего центра тяжести. Подобным же образом гелиоцентризм Солнечной системы обусловлен отношением этой системы в целом к внешним космическим телам.

В строении космических систем наблюдается резко выраженная структурность. Солнце и планеты с их спутниками, астероиды, кометы и многочисленные мелкие тела составляют обособленную систему, которая отделена от звезд очень большими расстояниями. Взаимные перемещения членов системы обусловлены внутренними причинами и лишь в ничтожной степени зависят от внешних воздействий. Эту особенность Солнечной системы можно назвать *а т о - н о м о с т ью*. Солнечная система, в свою очередь, является одним из членов космической системы более высокого порядка — Галактики, которая также обладает значительной автономностью в отношении ее внутренних свойств.

Рассмотрим движение Солнечной системы *S* в поле тяготения Галактики *G*. Отнесем это движение к системе отсчета, связанной тем или иным способом с *G*. Например, поместив начало координат в ядро Галактики и совместив одну из координатных плоскостей со средней плоскостью Галактики, можно связать расположенные в этой плоскости оси координат с достаточно удаленными от ядра звездами. При изучении движения системы *S* необходимо учитывать равенство инертной и тяжелой масс. Поскольку гравитационное притяжение и силы инерции соответственно пропорциональны тяжелой и инертной массам, можно утверждать, что вследствие относительно малых размеров системы *S* все тела ее, независимо от их положений и масс, а также от принятого выбора галактических координат, в общем поле Галактики имеют одинаковые ускорения. Поэтому если в какой-либо момент времени члены системы *S* имели одинаковые скорости, то вся система будет длительно двигаться как одно целое. Введем теперь местную систему отсчета, жестко-связанную с конфигурацией тел Солнечной системы в какой-либо определенный момент времени. Эту систему отсчета можно назвать *с о п у т с т в ю щ е й*; обозначим ее через *S*. Каждое тело, расположенное внутри или вблизи Солнечной системы и не испыты-

вающее притяжения со стороны его членов, двигалось бы относительно  $S$  равномерно и прямолинейно. Поэтому сопутствующая система  $S$  является местной инерциальной системой отсчета. При изучении движений внутри Солнечной системы ускорения в сопутствующих координатах можно было бы назвать абсолютными, поскольку их вычисление основано на обычных законах механики Ньютона. Если одно из тел системы  $S$  имеет достаточно большую массу, тогда как массы других тел относительно малы, то в сопутствующей системе отсчета первое будет практически покоиться, а остальные — обращаться вокруг него по замкнутым орбитам. Таким образом, ньютоново обоснование гелиоцентрического учения сохраняет значение и при отказе от концепции абсолютного пространства, если только под инерциальной системой подразумевается не абстрактная система координат, не связанная с материальными телами, а конкретная местная система отсчета, обусловленная внешними космическими массами [9].

Изложенные рассуждения основаны на механике Ньютона и на пропорциональности инертной и тяжелой масс. Обоснование системы Коперника с точки зрения ОТО отличалось бы от этих рассуждений только по форме, поскольку для такого обоснования достаточно первое приближение, в котором количественные выводы ОТО совпадают с результатами механики Ньютона.

Итак, гелиоцентризм Солнечной системы представляет собой динамическую закономерность, имеющую определенный физический смысл только по отношению к космической системе более высокого порядка. Если рассматривать Солнечную систему в отрыве от окружающих ее космических масс, то эта закономерность имела бы физический смысл лишь при абсолютности ускорений.

Некоторые авторы считают, что доказательство абсолютности ускорений содержится в известной работе В. А. Фока [10]. В этой работе рассматривается задача о движении конечных масс в ОТО. Основной частью исследования является приближенное интегрирование уравнений поля Эйнштейна для системы нескольких тел, рассматриваемых как особые области, внутри которых тензор энергии-импульса отличен от нуля. Вычисления выполняются в так называемых гармонических координатах, в которых компоненты метрического тензора удовлетворяют четырем условиям вида

$$\frac{\partial}{\partial x^\alpha} (g^{\alpha i} \sqrt{-g}) = 0; \quad i = 1, \dots, 4.$$

Поскольку изучаемая система тел считается изолированной, принимается, что на бесконечности метрика пространства-времени вырождается в евклидову. Допускается, что к системе не приходят внешние гравитационные волны, вследствие чего на бесконечности выполняется особое условие излучения.

В этой важной работе показано, что перечисленные три условия (гармоничность координат, псевдоевклидова метрика на бесконечности, условие излучения) с точностью до преобразования Лоренца определяют координаты, инерциальные для рассматриваемой системы тел. В таких координатах Солнечная система отвечает учению Коперника. Это заключение показывает, что уравнения поля ОТО допускают выбор группы систем отсчета, которые в данном приближении играют роль инерциальных координат. Однако такой вывод не решает проблемы гелиоцентризма Солнечной системы, поскольку материальная обусловленность указанной группы систем отсчета остается невыясненной. Привилегированность этих систем обусловлена, как мы видели, внешними космическими массами.

**9. Импульс и энергия поля гравитации.** Переходим к вопросу о количестве движения и энергии гравитационного поля, имеющему в ОТО большое принципиальное значение.

В теории Ньютона важными характеристиками механической системы являются понятия количества движения и энергии, которые при определенных условиях удовлетворяют известным законам сохранения. Пусть, например, дана система материальных точек, взаимодействующих по закону тяготения Ньютона и не испытывающих действия со стороны внешних сил и каких-либо сил другой природы. Обозначив массы материальных точек через  $m_i$ , а их декартовы координаты через  $x_i, y_i, z_i$ , можно написать закон движения так:

$$m_i \ddot{x}_i = -\frac{\partial U}{\partial x_i}; \quad m_i \ddot{y}_i = -\frac{\partial U}{\partial y_i}; \quad m_i \ddot{z}_i = -\frac{\partial U}{\partial z_i},$$

где  $U$  — потенциальная энергия системы, обусловленная гравитационным притяжением между всеми ее частицами и заданная известной формулой

$$U = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} \frac{\gamma m_i m_j}{r_{ij}}.$$

Пользуясь этим законом движения, нетрудно показать, что величины

$$\begin{aligned} P_1 &= \sum m_i \dot{x}_i; \quad P_2 = \sum m_i \dot{y}_i; \quad P_3 = \sum m_i \dot{z}_i; \\ E &= \sum \frac{1}{2} m_i v_i^2 + U \end{aligned} \tag{6,9,1}$$

остаются при движении системы постоянными. Первые три из них представляют собой проекции вектора количества движения, последняя равна полной энергии системы.

В более общей форме, пригодной как в случае дискретного, так и непрерывного распределения масс, выражение для гравитацион-