

А. Л. ДМИТРИЕВ

"Сущность физического эксперимента — вопрошать природу, а не диктовать ей свое, даже очень остроумное и оригинальное мнение".

А. Дмитриев

Управляемая ГРАВИТАЦИЯ

А. Л. Дмитриев

УПРАВЛЯЕМАЯ ГРАВИТАЦИЯ

;

МОСКВА
Новый Центр
2005

УДК 530.1
ББК 22.31, 22.632
Д53

Выражаю искреннюю признательность В. С. Снегову, Н. Н. Чеснокову, В. К. Пономареву, Е. М. Никущенко и Н. П. Барановской за участие и помошь в экспериментах и расчетах, Е. Л. Воскресенской за идейную поддержку.

Дмитриев А.Л.
Д53 УПРАВЛЯЕМАЯ ГРАВИТАЦИЯ. — М.: Новый Центр, 2005. — 70 с.
ISBN 5-89117-163-5

В книге представлены материалы авторских исследований в области физики гравитации. Экспериментальным путем и на основе физических аналогий показана возможность принципиально нового подхода к развитию физики тяготения, целью которого в перспективе является разработка и освоение методов управления гравитацией.

Книга предназначена для специалистов-физиков, занимающихся вопросами физики тяготения, а также для всех, интересующихся вопросами фундаментальной физики.

УДК 530.1
ББК 22.31, 22.632

ISBN 5-89117-163-5

© Дмитриев А.Л., 2005
© Новый Центр, оформление, 2005

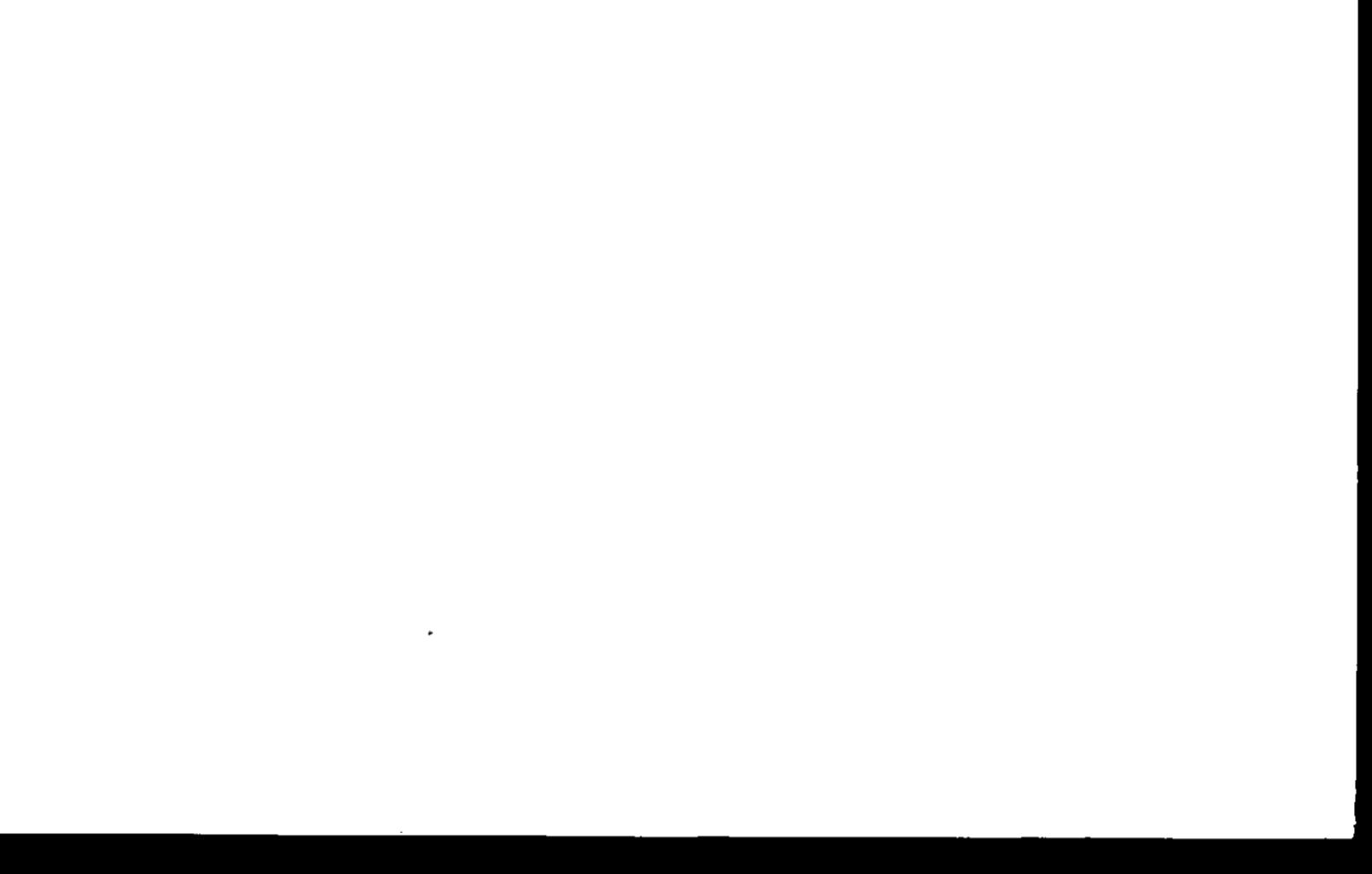
*Посвящаю моим родителям
Татьяне Васильевне и Леониду
Александровичу Дмитриевым*

*«Наука начинается там,
где начинаются измерения»*
Д. И. Менделеев

ВВЕДЕНИЕ

Название книги, возможно, вызовет упрек, а то и негодование большинства специалистов в области теоретической физики, не говоря уже о многочисленных энциклопедистах — защитниках «гранитного фундамента» естествознания. Еще бы! «О каком «управлении» может идти речь? Физикой гравитации занимались лучшие умы человечества! Великим Эйнштейном создана теория тяготения — наивысшее достижение человеческой мысли. Эта теория, развивающаяся и обогащаемая трудами последователей, дает практически исчерпывающее объяснение явлений гравитации. Всякое противоречие теории относительности и, тем более, попытки «управления гравитацией», есть невежество или хуже того — лженаука!».

Автор не намерен опровергать какие-либо физические теории, в том числе и весьма популярную общую теорию относительности — ОТО. Любая точка зрения в науке в известной степени оправдана и должна быть рассмотрена по возможности объективно. Однако неумеренно восторженные оценки тех или иных теоретических концепций и их усиленная пропаганда содержат немалую опасность: рано или поздно эти концепции становятся не генератором, а тормозом развития науки. Исторических примеров тому достаточно. Так, непререкаемый авторитет Аристотеля — выдающегося ученого античности — задержал развитие механики более чем на тысячелетие. Со времен Галилея известно, что наука развивается плодотворно лишь в тесной взаимосвязи опыта и теории, при этом эксперименту принадлежит безусловно ведущая роль. Именно опыт, как убеждал Галилей и его последователи, — источник знания. Сущность физического эксперимента — вопрошать природу, а не диктовать ей свое, даже очень остроумное и оригинальное мнение.



Хотя все это давно и хорошо известно, состояние физики гравитации сегодня напоминает эпоху, предшествующую времени Галилея. Физика гравитации как наука почти «исчезла», превратилась в раздел чистой математики. Десятки статей по проблемам тяготения, ежемесячно публикуемые в научных журналах, представляют собой почти исключительно математические труды высокого достоинства, в которых обычным стало обращение к многомерным пространствам, группам симметрии, квантовым, калибровочным полям, «струнам», «кортовским норам» и т. п. Физические приложения этих теорий обычно пребывают в сфере космогонии и астрофизики. Благодаря техническому прогрессу в рентгеновской, оптической, инфракрасной и радиоастрономии новые открываемые «в небесах» объекты и явления стимулируют построение все более замысловатых теорий. Гравитационные эксперименты, проводимые в земных условиях, крайне редки и, как правило, вызывают глубокое недоверие и неприятие, если их результаты хоть в чем-то противоречат релятивистским концепциям.

Существует и обширная «неканоническая» литература по физике гравитации. Авторы «неканонической» литературы чаще всего предлагают либо новое прочтение известных уравнений теории относительности, либо своеобразное описание и истолкование явлений тяготения на основе обновленных механических и электродинамических моделей. Как правило, в большинстве случаев речь идет исключительно о теоретической стороне вопроса.

Явный избыток теоретических трудов по физике гравитации объясняется влечением, заманчивостью древней загадки тяготения, обширным полем для научных фантазий, которое эта тема предоставляет. Эксперимент же, помимо своего идеиного содержания, требует немалых усилий по его организации, финансированию и преодолению массы, часто незаметных со стороны, технических трудностей.

Мы постараемся показать, как, придерживаясь феноменологического, основанного преимущественно на экспериментальных фактах, подхода с использованием полезных физических аналогий, можно углубить понимание физики тяготения и приблизиться к, казалось бы, неразрешимой проблеме управления силами гравитации.

1. ФЕНОМЕНОЛОГИЯ В ФИЗИКЕ

Термины «феноменология» (феномен — явление; логия — понятие), «феноменологический» используются в разных контекстах, в том числе и философском. В физике термин «феноменологический» означает «основанный на опытных данных, непосредственно следующий из опыта». Такие типично феноменологические понятия, как скорость, ускорение, сила, масса, температура, напряженность электрического, магнитного, гравитационного полей и др., постепенно формировались в ходе развития техники экспериментов и наиболее удобных способов описания их результатов. Целесообразность применения феноменологических величин и параметров объясняется тем, что с их помощью вводятся количественные характеристики физических систем, процессов и взаимодействий. Феноменологические величины непосредственно определяются конкретными правилами, процедурами измерений. Феноменологические характеристики в физике наиболее приближены к опыту, в отличие от абстрактных «микроскопических» и чисто «геометрических». В этом смысле заслуживает внимания известная рекомендация Бриджмена: в физической теории уместно использовать те характеристики и параметры физического объекта, величины которых могут быть определены согласно специальной строго определенной экспериментальной процедуре измерений. Только при этом условии в теории можно избежать противоречий и разного рода неразрешимых парадоксов.

Развитие математического аппарата физических теорий привело к введению абстрактных характеристик физических взаимодействий — скалярного и векторного потенциалов, тен-

зора энергии-импульса электромагнитного поля, геометрической и калибровочной концепции физических полей, кривизны пространства-времени и др. Отдавая должное изяществу математических построений таких теорий, нельзя не отметить их нередко схоластический, далекий от реальности характер. Так, введение тензора энергии-импульса электромагнитного поля, при всей его математической красоте, мало способствовало развитию практики электромагнетизма. Давно известно, что «книга природы написана языком математики», однако достойно сожаления, если этот математический «язык» развивается сам по себе до чрезмерно абстрактных, бесполезных, оторванных от реальности форм. Нередко бытующее среди теоретиков утверждение, что «математика» — это еще и своего рода особое «зрение», заменяющее физический опыт, не вполне корректно и имеет ограниченную ценность.

Старым примером полезной феноменологической величины в физике является понятие силы. При всех трудностях его строгого определения (в ОТО сила фиктивна) сила была и остается практически полезной характеристикой при описании как механических, так и других видов взаимодействий. Своебразная живучесть понятия «сила» вызвана простотой и удобством использования этой характеристики при описании многих физических экспериментов и их результатов.

2. ФИЗИЧЕСКИЕ АНАЛОГИИ

Опыт развития науки подтверждает, что познание нового всегда базируется на старом, уже приобретенном и осмысленном фактическом материале. Поэтому вполне естественно, что объяснение ранее неизвестных фактов на первых порах удобнее всего строить на основе аналогии наблюдаемого явления с уже известным. Физические аналогии необходимы и полезны, когда нужно сравнить неизученную систему с системой более изученной [30]. Они не только дают возможность перенести освоенные методы анализа в неисследованные области, но и способствуют поиску ранее неисследованных физических процессов и явлений. Так, механические и акустические аналоги электронных процессов содействовали активному развитию электротехники и электродинамики, а первая капельная модель ядра Бора использовала понятие сил поверхностного натяжения обычных жидкостей. По мере накопления экспериментальных данных о новом явлении, первоначальный, построенный на простых аналогиях, способ его теоретического описания сменяется более совершенным, то есть описывающим свойства явления более полно и точно.

Особый интерес представляют аналогии механических, электродинамических, а также химических процессов, в которых проявляется определенная устойчивость, инертность рассматриваемых систем. Такая инертность (стабильность) физической либо физико-химической системы исключает «катастрофический» сценарий развития процессов в ней, что и является условием долговременного существования системы. Например, всякое механическое действие сопровождается противодействием; ускорение, приобретаемое телом под дей-

ствием силы, обратно величине массы тела; индукционные токи в проводниках имеют направление, способствующее генерации магнитного поля, компенсирующего изменения внешнего магнитного поля (правило Ленца); луч света стремится в область повышенной плотности (показателя преломления) среды; химическая реакция протекает в направлении, ослабляющем действие факторов, нарушающих термодинамическое равновесие в системе (принцип Ле Шателье—Брауна) и др. Можно предположить, что и в физике гравитации действуют закономерности и макропроцессы, в чем-то аналогичные приведенным выше.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВАНИЯ ЗАКОНА ТЯГОТЕНИЯ

Тяготение, или гравитация, — наиболее известный вид физического взаимодействия тел, с проявлением которого — притяжением Земли — любой человек знаком с раннего детства [3]. Первые попытки оценки количественных характеристик тяготения принадлежат Аристотелю, предположившему, что скорость падения тел пропорциональна их весу, — результат для своего времени выдающийся. Трудами Стивина и Галилея экспериментально показано, что движение падающих тел носит равноускоренный характер. Гюйгенсом установлена степенная зависимость периода колебаний маятника от его длины и созданы первые точные часы — прибор, необходимый в динамических исследованиях. Ньютона предложил выражение для силы F взаимного тяготения точечных масс (m_1, m_2), расположенных на расстоянии r ,

$$F = Gm_1m_2/r^2, \quad (1)$$

на основе которого, с учетом сформулированных им принципов динамики, получено объяснение законов Кеплера. Численное значение гравитационной постоянной впервые получено в опытах Кавендиша. Закон всемирного тяготения (1), предполагающий мгновенное распространение гравитации (в этой формуле отсутствует время), до сих пор является основой небесной механики и гравиметрии. Огромное количество экспериментальных результатов, полученных в этих областях, объясняется простым законом (1), что и доказывает его справедливость.

Потенциальная энергия V гравитационного взаимодействия двух масс в общем случае пропорциональна сумме ньютона потенциала и потенциала Юкавы,

$$V = -Gm_1m_2(1 + \alpha \exp(-\mu r))/r, \quad (2)$$

где параметры α и μ характеризуют возможное отличие закона тяготения от ньютоновского (1). В астрономических масштабах вклад неньютоновых эффектов тяготения исчезающе мал, а лабораторные оценки коэффициентов α и μ на расстояниях r от нескольких миллиметров до сотен метров дают значение $\alpha\mu^2 < 0.03 m^{-2}$ [37]. Поиск избыточной «пятой силы» тяготения пока не дал надежных результатов.

Множество «положительных» экспериментальных результатов в области гравиметрии и небесной механики подтверждают закон (1), при этом экспериментальная величина гравитационной постоянной определена со сравнительно невысокой, примерно в 5 значащих цифрах, точностью, $G = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-2}$. (Для сравнения: современное значение постоянной Ридберга содержит 10 значащих цифр.) Примечательно, что при относительной погрешности измерения величины G около 10^{-5} значения G в разных экспериментах отличаются более чем на порядок, на $4 \cdot 10^{-4}$ [43], — факт, заслуживающий внимания.

По исследованию сил гравитации выполнено большое число лабораторных экспериментов, демонстрирующих «нулевые», то есть не выходящие за рамки закона (1), результаты. Как правило, эти эксперименты ставились с целью проверки новых теорий, уточняющих формулировку закона тяготения. Из них наиболее известны формулы закона тяготения, предложенные Вебером, Ритцем и Гербером [39, 47, 52] и учитывающие скорость распространения гравитации. Первые попытки количественно измерить поглощение гравитации предприняты Аустином и Твингом [35]:

$$F = F_0 \exp(-h\rho r), \quad (3)$$

где F_0 — ньютоново значение силы тяготения, ρ — плотность среды между точечными массами, h — коэффициент поглощения гравитации. Измерения поглощения гравитации выполнялись и рядом других исследователей, в том числе Майораной [44]. В пределах погрешностей измерений найденные положительные значения коэффициента h были близки к нулю.

Зависимость силы тяготения от температуры взаимодействующих масс экспериментально исследовалась Шоу и другими авторами [49, 50]. Согласно электродинамическим теориям (Ми, Вебер, Морозов [31]), можно ожидать увеличения силы притяжения при росте абсолютной температуры одного из притягивающихся тел:

$$F = F_0(1 + \alpha T). \quad (4)$$

Полученное Шоу экспериментальное значение $\alpha = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ позднее было признано недостоверным.

Широко известным в экспериментальной гравитации «нулевым результатом» является независимость ускорения силы тяжести от физической природы (состава) взаимодействующих тел. Этот результат истолковывается как пропорциональность, даже неразличимость, тождественность, инертной и тяжелой масс, что и составляет идею «слабого принципа эквивалентности». Механические опыты Ньютона, Бесселя, Этвеша, Ролла, Кроткова, Дикке, Брагинского и Панова и других показали, что относительная величина δ разности инертной и тяготеющей масс не превышает 10^{-12} [3, 33, 48]. Тяжелая масса тела (m_g) фигурирует в выражении закона тяготения Ньютона (1), а инертная (m_a) как коэффициент пропорциональности связывает ускорение a и величину действующей силы F (второй закон динамики Ньютона, $a = m_a^{-1}F$). Отметим, что прямая пропорциональность массы тела числу N составляющих его частиц надежно установлена в корпускулярной модели

ли вещества. Изменение $(N + m)$ числа частиц ($m = 1, 2, \dots$) приводит к пропорциональному изменению как тяжелой (m_g), так и инертной (m_a) массы тела. Поэтому прямая пропорциональность, $m_g \propto m_a$, этих масс очевидна. Хотя инертная и тяжелая массы физически различны, из предположения тождественности их величин и размерностей определяются величина и размерность гравитационной постоянной G . Неравенство инертной и тяжелой масс тела можно ожидать согласно искусственной гипотезе различия инертных и тяжелых свойств «энергии взаимодействия» частиц тела, что, впрочем, в корне отвергается в ОТО; одним из постулатов ОТО является неразличимость инертных и тяготеющих свойств «энергии», при этом любой форме энергии E в ОТО приписывается вес gE/c^2 , где g — ускорение силы тяжести и c — скорость света в вакууме.

В наиболее точных механических экспериментах по проверке «принципа эквивалентности» использовались крутильные весы, поэтому в этих опытах фактически с высокой точностью доказано не равенство инертной и тяжелой масс (или соответствующих сил), а равенство моментов сил, действующих на пробные тела различного состава. По этой причине в этих экспериментах оценка относительной величины δ разности тяжелой и инертной масс, скорее всего, занижена вследствие неизбежных температурных флуктуаций длины коромысла крутильных весов (длин радиусов-векторов, входящих в выражения моментов сил). Простые расчеты показывают: относительное изменение температуры $\Delta T/T$ материала коромысла приводит к соответствующему относительному изменению длины коромысла, соизмеримому с полученными оценками величины $\delta \sim 10^{-12}$ или даже превосходящему его.

Лабораторные измерения различия инертной и тяготеющей масс обычно выполнялись в условиях высокой стабилизации температур пробных тел, так как температурные флу-

туации являются источником различных помех. Но в указанных решающих экспериментах по проверке «принципа эквивалентности» всегда оставался открытым вопрос, зависит ли отношение тяжелой и инертной масс пробных тел от их температуры.

Среди наиболее известных гравитационных экспериментов, показавших «нулевые» результаты, можно отметить опыты Хаясака и Такеучи, Фэллера и др., Куина и Пикара [38, 42, 46] по взвешиванию механического ротора с вертикальной осью; и опыты Подклетнова, Хэзевэя и др. по взвешиванию вращающегося сверхпроводящего диска [41, 45]. Хотя, эти эксперименты не дали результатов, выходящих за рамки закона Ньютона, они были несомненно полезны как попытки установления новых свойств гравитации, обнаруживаемых в лабораторных экспериментах с телами макроразмеров.

4. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ И ПОЛЕВЫЕ ТЕОРИИ ТЯГОТЕНИЯ

Поиск более глубоких, «не лежащих на поверхности», причин физических явлений закономерен в процессе познания и осмысления окружающего мира. По поводу тяготения Ньютон заметил: «Причину же этих свойств силы тяготения я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю. Все же, что не выводится из явлений, должно называться гипотезою, гипотезам же метафизическим, физическим, механическим, скрытым свойствам не место в экспериментальной философии» [29]. Этим широко известным словам, выражющим сущность здравого научного подхода, более 300 лет. К сожалению, развитие теорий гравитации в XIX и особенно в XX веке фактически происходило под знаком забвения приведенного напутствия Ньютона, признания его устаревшим. При довольно ограниченном наборе опытных данных происходило измышление, то есть выдумывание множества различного рода абстрактных гипотез, призванных объяснить истинную причину тяготения [3, 15, 28, 33].

Известное положение Галилея: «Книга природы написана языком математики» — было трансформировано в утверждение, что математический подход в толковании тяготения является своего рода новым «зрением», то есть своеобразным опытом, фактически подменяющим реальный эксперимент. Основой теоретической модели явления впредь служил уже не экспериментальный факт, а удачно найденное математическое уравнение. Эксперимент должен был подтвердить либо опровергнуть заранее сформулированную — чисто умозрительную — гипотезу.

Указанный подход в известной степени можно оправдать, если исходить из философской — кантианской — концепции о врожденности мыслимых человеком представлений и их адекватности окружающему миру. К сожалению, переоценка абстрактных математических подходов в физике скорее создает почву для бесплодной научной схоластики. Избежать парадоксов и явных противоречий (расходимостей, сингулярностей и др.) в теории можно, следуя здравой рекомендации Ньютона, в более поздней формулировке Маха: назначение физической теории, прежде всего, — описание и объяснение фактов эксперимента [25]. Эксперименту в физике должна принадлежать ведущая роль.

К началу XX века не было найдено достоверных экспериментальных, в том числе лабораторных, результатов изучения гравитации, описание которых выходило бы за рамки закона тяготения Ньютона. Безуспешные попытки установить связь гравитационных и электромагнитных полей стимулировали воображение теоретиков, надеющихся найти единый подход описания силовых взаимодействий в физике. Особую популярность приобрел «геометрический подход», сущность которого состоит в истолковании гравитационных взаимодействий как проявления особых свойств «пространства-времени». Предложенная Минковским концепция «плоского» четырехмерного пространства-времени нашла обобщение в псевдоримановом (ПР) пространстве Эйнштейна—Гроссмана [15]. Если модель Минковского позволила преодолеть некоторые парадоксы электродинамики движущихся тел простым постулированием специальных правил преобразования систем координат (преобразований Лоренца), то в модели Эйнштейна—Гроссмана притяжение тел, всемирное тяготение истолковываются (лучше сказать, определяются) как проявление особых свойств абстрактного псевдориманова пространства-времени. В ОТО движение тел характеризуется как простое — равномерное — движение по геодезической (кратчайшей) линии в ПР-пространстве, старое понятие «сила тяготения» признается фиктивным, а характеристики, в том числе кривизна R ПР-пространства, описываются специальным уравнением Эйнштейна

$$R_{\alpha\beta} - 1/2g_{\alpha\beta}R - \Lambda g_{\alpha\beta} = -8\pi G/c^2 T_{\alpha\beta}, \quad (5)$$

где $R_{\alpha\beta}$ — тензор Риччи, $T_{\alpha\beta}$ — тензор энергии-импульса материи, c — скорость света, G — гравитационная постоянная, $g_{\alpha\beta}$ — метрика пространства-времени (потенциалы Эйнштейна), Λ — космологическая постоянная.

Уравнение (5) выражает зависимость свойств пространства-времени (величин $g_{\alpha\beta}$ и $R_{\alpha\beta}$) от распределения и движения тяготеющих масс в пространстве.

Постулированное Эйнштейном тензорное уравнение (5) исследовано в многочисленных математических трудах, и при его использовании получено объяснение ряда астрофизических явлений — закон тяготения Ньютона, аномалии в движении перигелия Меркурия, отклонение света в гравитационном поле Солнца, гравитационное красное смещение, запаздывание радарного эха от планет и др. Основанная на уравнении (5) ОТО математически довольно громоздка (содержит вместо одного ньютонова потенциала десять эйнштейновских потенциалов $g_{\alpha\beta}$) и не всегда приводит к однозначным решениям нелинейных уравнений поля. В ней не удается построить удовлетворительное выражение для тензора энергии-импульса гравитационного поля, имеются проблемы сингулярностей. Тем не менее, ОТО обладает своеобразной математической привлекательностью и инициировала исключительный по масштабам поток теоретических исследований. В этом потоке исчезли либо были отодвинуты в сторону как устаревшие другие концепции и теоретические модели, объяснявшие явления гравитации (теории Ми, Вебера и др. [3]).

Фактически в ОТО не устанавливается «истинная причина» тяготения, а косвенным, нетривиальным способом постулируется его наличие и прямая зависимость тяготения от «классической» массы и энергии тел. Поэтому принципиально ОТО не принесла ничего нового по сравнению с утверждением Ньютона: «достаточно того, что тяготение существует...», предложив лишь иной «взгляд» на гравитацию. При этом понятия массы и энергии в ОТО прямо заимствованы из клас-

сической механики. Замена физического поля в пространстве как области действия гравитационных сил понятием пространства-времени, наделенным специфическими свойствами (особой «метрикой»), представляет собой чисто математическую абстракцию. Характерно, что в основном уравнении (5) фигурирует и скорость света — константа, строго определяемая в электродинамике. Введение скорости света в уравнения, описывающие свойства гравитации, также является ни чем иным как гипотезой, поскольку прямых экспериментальных свидетельств связи электромагнитных явлений и гравитации к моменту создания ОТО не было. В отличие от основных уравнений классической механики и уравнений электромагнетизма, параметры ($g_{\alpha\beta}$, $R_{\alpha\beta}$, $T_{\alpha\beta}$), входящие в основное уравнение (5), лишь косвенным образом связаны с измеряемыми в экспериментах величинами.

Геометрическое истолкование тяготения как проявление «искривления пространства-времени» и связанные с таким подходом принципиальные затруднения (неопределенность энергии гравитационного поля, сингулярности и др.) обусловили поиск альтернативных теорий гравитации, в том числе полевых, построенных по аналогии с квантовой электродинамикой и квантовой теорией поля [36, 51]. В «полевых» теориях гравитации поле тяготения представляется «материальным», подобным другим физическим полям, ответственным за различные виды взаимодействий (слабое, сильное и др.), при этом ареной таких полей непременно служит «плоское» четырехмерное пространство Минковского. Разрабатывается и своего рода «симбиоз» геометрических и полевых теорий гравитации — релятивистская теория гравитации, в которой при сохранении преобразований Лоренца действие гравитации обусловлено искривлением пространства-времени [20].

Прямыми следствием полевого подхода и его развития в квантовой теории гравитации является гипотеза о квантах гравитационного поля — гравитонах, ответственных за притяжение тел. Впрочем, правомерность квантования дальнодействующего гравитационного поля, в отличие от квантования электромагнитного и других полей в физике элементарных частиц,

не является общепризнанной: трудно, к примеру, вообразить, какой величины «поток» виртуальных гравитонов должна генерировать одна элементарная частица вещества, одновременно взаимодействующая с бесчисленным множеством аналогичных частиц, расположенных в телесном угле 4π и удаленных, скажем, на расстояние до одного светового года.

Традиционной областью приложений ОТО, полевых теорий тяготения и их многочисленных модификаций обычно является астрофизика и космология. Согласно этим теориям, в «слабых» гравитационных полях, действующих в лабораторных условиях, какие-либо отклонения от закона тяготения Ньютона не должны наблюдаться. Различия принципиальных положений геометрического и квантового описаний гравитации демонстрируются лишь в «сильных» гравитационных полях, в гипотетических процессах рождения частиц из вакуума, генерации гравитационных волн, образования экзотических «черных дыр», начала и конца Вселенной и прочих. Астрофизические явления весьма разнообразны, часто допускают различные физические истолкования, поэтому их соответствие тем или иным современным теориям гравитации в большой степени относится к области научных гипотез и не вполне надежно.

Примером лабораторного применения уравнений ОТО может быть теоретическая оценка влияния температуры тел на силу их гравитационного взаимодействия. Принципиально такая взаимосвязь существует, так как температура входит в выражения для компонент тензора энергии-импульса рассматриваемой системы тел. На основе известного положения ОТО о «тяжести энергии» Ассис и Климент показали [34], что температурное относительное изменение силы притяжения двух молекул равно

$$\frac{\delta F}{F} = 3k_B \left(\frac{\delta T_1}{m_1 c^2} + \frac{\delta T_2}{m_2 c^2} \right), \quad (6)$$

где k_B — постоянная Больцмана, c — скорость света, m_1 и m_2 — массы молекул, δT_1 и δT_2 — изменения абсолютной

температуры молекулярной среды. Примечательно, что похожая формула следует и из закона тяготения Вебера. Можно показать [34], что для тел лабораторных масштабов температурное относительное изменение силы тяжести, в соответствии с (6), порядка 10^{-14} град $^{-1}$, то есть, согласно ОТО, практически не наблюдаемо.

В отношении очень популярных в последние годы теоретических подходов, основанных на понятиях скрытых размерностей, можно заметить следующее. Использование физиками-теоретиками пятого, шестого; одиннадцатого и т. д. измерений подобно тому, как если бы при решении трудной шахматной задачи игрок «через третье измерение» ставил бы на доску новую фигуру либо убирал старую неудобную фигуру. Таким приемом, очевидно, можно решить любую шахматную задачу, а в многомерной теории — объяснить все что угодно.

5. ГРАВИТАЦИЯ И УСКОРЕНИЕ ТЕЛ

Экспериментаторы (да и теоретики) долгое время оставляли практически без внимания вопрос о возможном влиянии ускорений тела, обусловленных действием внешних негравитационных сил, на испытываемое этим телом ускорение силы тяжести (силу тяготения). Причина этого невнимания в том, что, как отмечалось выше, и геометрическая (ОТО), и полевая теории гравитации априори отвергают возможности проявления каких-либо неклассических эффектов в слабых (лабораторных) гравитационных полях. Между тем, подобная взаимосвязь напрашивается из простого логического, базирующегося на классических воззрениях, рассуждения: если ускорение, к примеру, свободно падающего тела обусловлено действием силы тяжести, то по соображениям симметрии должна иметь место и обратная зависимость — изменение силы тяжести, приложенной к телу, вследствие искусственного, вызванного влиянием сторонних негравитационных сил, изменения его ускорения. Такая взаимосвязь может и должна проявить себя в экспериментах с пробными телами не только космических, но и лабораторных масштабов.

Прямое измерение силы тяжести часто осуществляется при ее компенсации внешними силами, имеющими электромагнитную природу. Например, в экспериментах Кавендиша и в опытах Этвеша измерение величины силы гравитации, действующей на пробное тело, основано на измерениях силы упругости закрученной нити [37]. Фактически уже в этих классических экспериментах непосредственно проявляется глубокая взаимосвязь сил гравитации и электромагнетизма в их феноменологическом истолковании. Возникает вопрос: сущ-

ствует ли «сила реакции» в описании подобной взаимосвязи, а именно: может ли действующая на пробное тело упругая (в сущности — электромагнитная) сила как-либо повлиять на величину приложенной к пробному телу силы тяготения? Постановка такого вопроса естественна, принимая во внимание многочисленные аналогии в поведении целого ряда физических, а также химических систем, обнаруживающих тенденцию к сохранению стабильного состояния (правило Ленца, принцип Ле Шателье—Брауна).

Трактовка гравитационного взаимодействия как проявление кривизны пространства-времени, а также полевые (в том числе квантовые) теории гравитации затрудняют либо вовсе исключают влияние сторонних электромагнитных сил на силу гравитации. Между тем, простые феноменологические подходы при описании взаимодействий тел неоднократно демонстрировали свою полезность и эффективность при решении многих физических задач. Рассмотрим следствия возможного влияния внешних упругих сил, приложенных к телу, на испытываемую им силу тяжести [7].

Пусть в однородном гравитационном поле для неподвижного относительно Земли либо свободно падающего тела величина ускорения силы тяжести постоянна и равна g_0 . Если под влиянием внешней упругой силы это тело, например шар, ускоренно перемещается вверх, то приращение Δg_c ускорения силы тяжести формально, в первом приближении, можно положить прямо пропорциональным величине ускорения внешней силы,

$$\Delta g_c = \alpha_c a_g, \quad (7)$$

где a_g — вертикальная составляющая ускорения внешней силы.

При ускоренном (также под действием внешней силы) движении пробного шара вниз соответствующее приращение ускорения силы тяжести меняет знак и, вообще говоря, величину,

$$\Delta g_p = -\alpha_p a_g. \quad (8)$$

В формулах (7) и (8) безразмерные коэффициенты α_c и

α_p характеризуют степень влияния внешних негравитационных, например упругих, сил на силу тяжести. Определить, отличны ли от нуля эти коэффициенты и чему равны их численные значения, можно только экспериментально. Для этого необходимо выполнить высокоточное взвешивание пробного тела, испытывающего значительные, обусловленные действием внешних негравитационных сил, ускорения.

На практике точное взвешивание тел нередко сопровождается их ускоренным движением — при таких измерениях коромысло весов совершает медленно затухающие угловые колебания. Малые величины ускорений, испытываемых пробными телами при их взвешивании, могли быть причиной того, что влияние этих ускорений на результаты точного взвешивания долго оставалось незамеченным. Специальных исследований влияния искусственных ускорений пробных тел на результаты их взвешивания не проводилось, по-видимому, со времен Ньютона и до конца XX века.

Простой способ оценки разности коэффициентов α_c и

α_p основан на взвешивании ротора механического гироскопа с горизонтально ориентированной осью вращения. Вращательное движение массивного ротора сопровождается центростремительными ускорениями составляющих его материальных частиц, при этом роль сторонних негравитационных сил, действующих на частицы ротора, играют силы упругости. На основе (7) и (8), выполняя интегрирование приращений Δg_c и

Δg_p по всему объему ротора, можно показать, что вес P горизонтально ориентированного ротора в виде цилиндра с внутренним радиусом R_1 и внешним R_2 равен

$$P = mg_0 \left[1 - (\alpha_p - \alpha_c) \frac{2(R_2^3 - R_1^3)}{3\pi g_0 (R_2^2 - R_1^2)} \omega^2 \right], \quad (9)$$

где m — масса ротора и ω — угловая скорость его вращения.

Высокоточное взвешивание роторов с большим кинетическим моментом осложнено влиянием гироскопического эффекта, обусловленного суточным вращением Земли [22]. Эта помеха исключается при взвешивании пары соосных роторов с противоположно направленными и равными по величине векторами кинетических моментов. Суммарный кинетический момент взвешиваемого контейнера с установленными в нем роторами при этом равен нулю, что устраняет влияние гироскопического эффекта. Такой эксперимент был выполнен с использованием двух высококачественных вакуумированных роторов авиационных гироскопов марки ГМС-1, установленных в закрытом теплоизолированном контейнере массой около 1609,845 г и размерами $70 \times 70 \times 145$ мм (рис. 1) [12].

Последовательное взвешивание контейнера с горизонтальной и вертикальной ориентацией оси вращения роторов производилось на высокоточном компараторе марки СС2000 фирмы Sartorius в специальном метрологическом помещении.

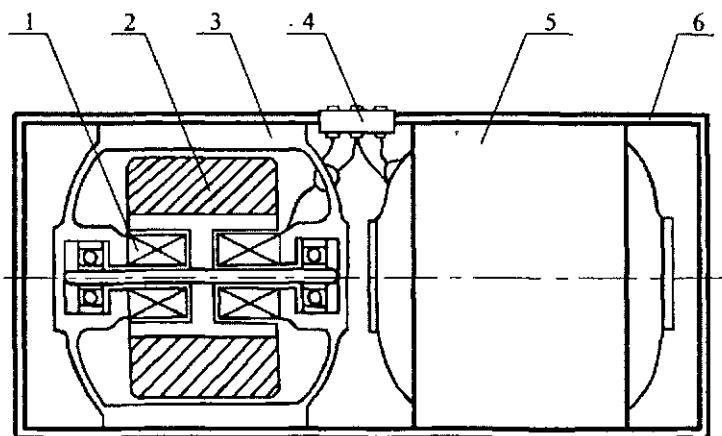


Рис. 1. Устройство взвешиваемого контейнера:

1 — электрические обмотки статора асинхронного двигателя гироскопа; 2 — массивная цилиндрическая часть ротора; 3 — корпус первого гироскопа; 4 — клеммы электропитания двигателей гироскопов; 5 — корпус второго гироскопа (показан без разреза); 6 — корпус контейнера

При измерениях учитывалось влияние температурных эффектов, электромагнитных помех и плавучести. Результаты измерений зависимости разности масс контейнера при горизонтальной и вертикальной ориентации оси вращения роторов от частоты (ν) вращения роторов и от времени выбегания роторов приведены на рис. 2.

Постоянная составляющая измеряемой разности масс величиной около 3,2 мг (при $\nu = 0$), по-видимому, была обусловлена остаточной намагниченностью металлических корпусов роторов. С учетом этого обстоятельства на основе (9) выполнена оценка разности коэффициентов взаимодействия ($\alpha_p - \alpha_c$), которая по порядку величины оказалась близкой к

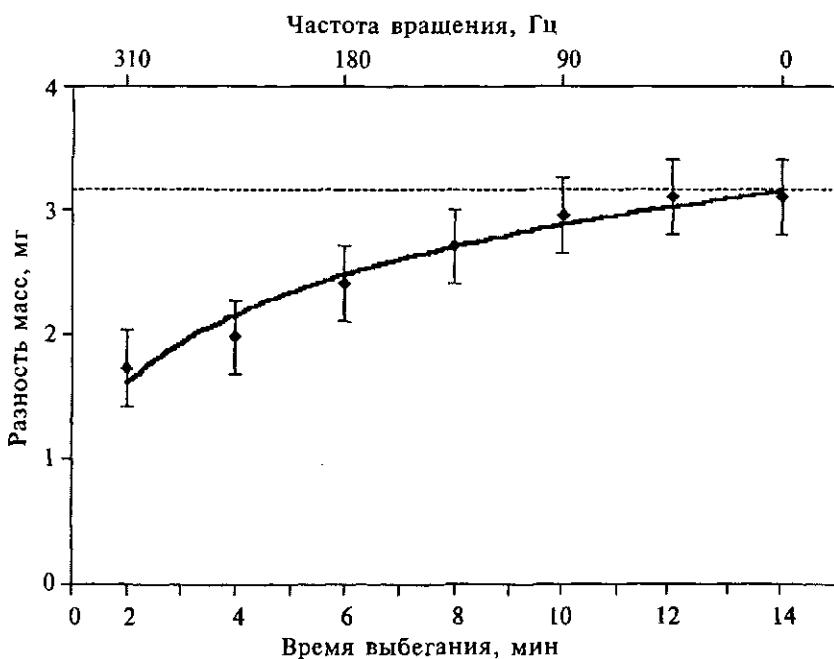


Рис. 2. Экспериментальная зависимость измеряемой разности масс контейнера с горизонтально и вертикально ориентированной осью вращения роторов от времени выбегания и частоты вращения роторов

10^{-7} (внутренний и внешний радиусы ротора равнялись, соответственно, 15 и 25 мм, масса ротора около 250 г).

Как уже отмечалось, ранее неоднократно проводились точные измерения массы вращающихся роторов механических гироскопов [38, 42, 46], при этом влияние вращения роторов на показания весов не было обнаружено. Принципиальная особенность описываемого эксперимента в отличие от предыдущих состоит в том, что его целью было измерение массы ротора с горизонтальной осью вращения, а не только с вертикальной, как в указанных работах.

Если тело массой m совершает гармонические колебания под действием периодической внешней силы, то из уравнений (7) и (8) следует, что его вес P , усредненный за период колебаний, равен

$$P = mg_0 \left[1 - (\alpha_p - \alpha_c) \frac{A\omega^2}{\pi g_0} \right], \quad (10)$$

где A — амплитуда и ω — круговая частота колебаний. Квадратичная зависимость веса P от круговой частоты колебаний ω указывает, что влияние ускорения внешних сил на вес тела должно быть существенным при высоких, например ультразвуковых, частотах колебаний тела. Были выполнены эксперименты по взвешиванию пьезокерамической пластины в переменном электрическом поле на частотах, близких к частоте собственных колебаний пластины (около 6 МГц). Значительной помехой таким измерениям были неоднородности электрического поля в пределах взвешиваемого образца, обуславливающие действие пондеромоторных сил поля. Принципиально тщательные измерения веса колеблющихся по вертикали тел, выполненные при достаточно больших амплитудах и частотах колебаний с учетом влияния внешних физических факторов, могут использоваться для проверки соотношений (7) и (8).

Взвешивание вращающихся либо колеблющихся в вертикальной плоскости образцов пробных тел позволяет оценить

лишь разность коэффициентов взаимодействия α_p и α_c . Измерения абсолютных величин этих коэффициентов могут быть выполнены, например, на основе тщательного анализа механических ударных явлений. Так, при квазиупругом ударе шара о массивную плиту пробный шар в течение длительности удара испытывает ускорения, достигающие нескольких десятков тысяч нормальных ускорений g_0 [5]. В таких ударных экспериментах приращения величин Δg_c , Δg_p ускорений силы тяжести, обусловленные взаимодействием упругих и гравитационных сил, могут быть значительными, позволяющими выполнить количественную оценку коэффициентов α_c и α_p .

При вертикальном ударе шара о плиту (рис. 3 а) средняя сила F_l , действующая на шар в течение длительности удара, по величине равна $(F - G - \Delta G)$, где F — сила упругости, приложенная к шару со стороны плиты, $G = mg_0$, $\Delta G = m\Delta g_c$, m — масса шара. При горизонтальном ударе (рис. 3 б) нор-

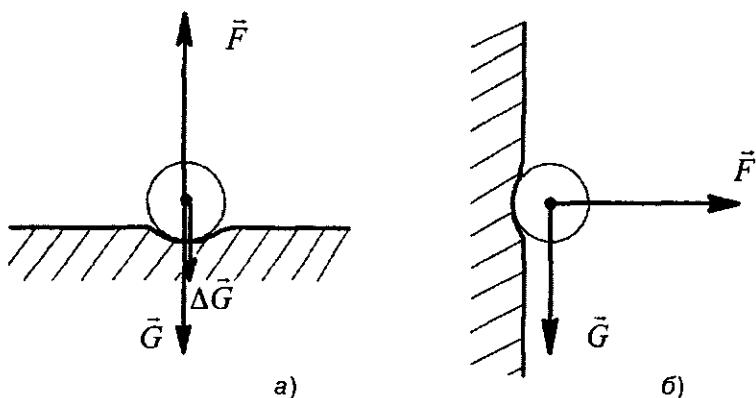


Рис. 3. Вертикальный (а) и горизонтальный (б) удары шара о плиту

мальная составляющая силы F_2 , вызывающей ускорение шара при ударе, практически равна силе упругости, $F_2 = F$. Очевидно, при $\alpha_c \neq 0$ и $\Delta g_c > 0$ сила F_1 меньше F_2 , причем разность этих сил может зависеть от величины ускорения шара при ударе. Неравенство сил F_1 и F_2 , в свою очередь, обуславливает различие коэффициентов восстановления (отношений нормальных составляющих скоростей шара после и до удара), измеренных при вертикальном (k_1) и горизонтальном (k_2) ударах. Величина α_c приближенно может быть оценена следующим образом:

$$\alpha_c = \frac{k_2 - k_1}{1 + k_2}. \quad (11)$$

Действительно, при квазиупругих ударах стального пробного шара диаметром 4,7 мм по массивной полированной стальной плите экспериментально зафиксировано различие коэффициентов восстановления k_1 и k_2 , наблюдаемое при ускорениях шара $a_g \geq 3 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2$ (при этом скорость шара перед ударом больше 3 м/с), рис. 4 [9].

Полагая, что полученное различие коэффициентов восстановления k_1 и k_2 обусловлено отмеченным выше взаимодействием упругих и гравитационных сил при ударе, получаем численную оценку коэффициента взаимодействия α_c , которая при начальных скоростях шара около 3,5 м/с составляет неожиданно большую величину $|\alpha_c| \approx 10^{-2}$. Это означает, что взаимодействие упругих и гравитационных сил сравнительно велико и в принципе доступно измерениям в лабораторном макроэксперименте.

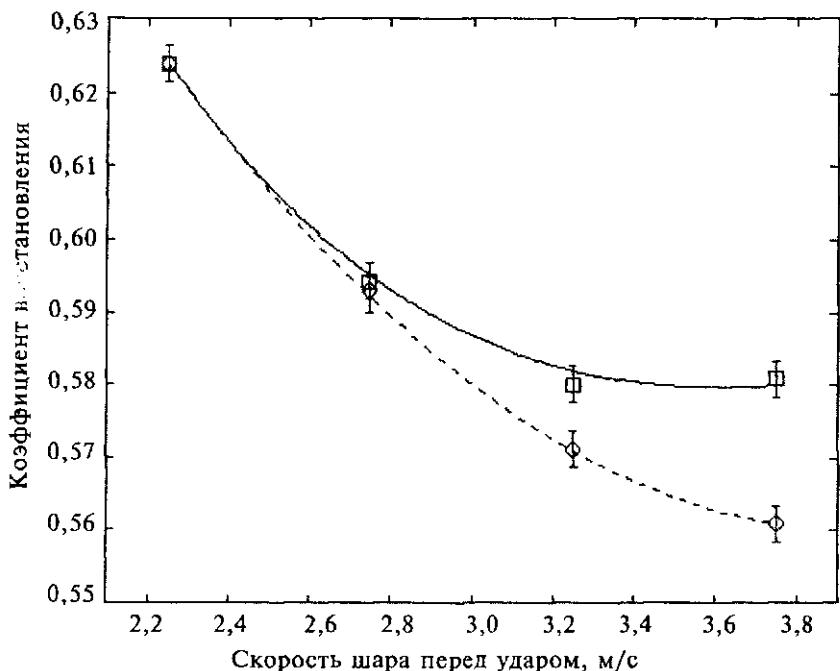


Рис. 4. Экспериментальная зависимость коэффициентов восстановления при горизонтальном (сплошная линия) и вертикальном (штриховая линия) ударах шара о плиту от скорости шара перед ударом

Подчеркнем, что неравенство нулю коэффициентов α_c и α_p взаимодействия упругих и гравитационных сил, следующее из описанных выше ударных механических экспериментов, не противоречит известным экспериментальным фактам классической механики.

6. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

6.1. ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ТЕОРИЯ

В предыдущей главе показано, что приращение ускорения силы тяжести в первом (линейном) приближении пропорционально ускорению a действующих на тело внешних упругих сил, при этом величина и знак приращения ускорения силы тяжести зависят от направления вектора \vec{a} . Если упругие силы влияют на силу тяжести, то необходимым следствием этого влияния должна быть зависимость силы тяготения, приложенной к пробному телу, от температуры тела. Приведем краткое обоснование этого утверждения и опишем эксперименты по измерению влияния температуры на вес тела [10].

Материальная точка (или тело) массой m , совершающая под действием внешней упругой силы вертикальные гармонические колебания, испытывает среднюю за период колебаний силу тяжести p , равную

$$p = mg_0 \left(1 - \frac{\alpha_{pc} A\omega^2}{\pi g_0} \right), \quad (12)$$

где g_0 — нормальное ускорение силы тяжести; $\alpha_{pc} = (\alpha_p - \alpha_c)$ — разность коэффициентов взаимодействия упру-

гих и гравитационных сил для попутного (α_p) и встречного (α_c) относительно направления силы тяжести ускоренных движений тела; A — амплитуда и ω — круговая частота колебаний (см. 10). Произведение $A\omega^2$, равное максимальному ускорению осциллирующей массы, выражается через полную энергию E колебаний механического осциллятора:

$$A\omega^2 = \frac{\sqrt{2c}}{m} \cdot \sqrt{E}, \quad (13)$$

где c — коэффициент упругости, характеризующий зависимость величины возвращающей силы от смещения массы [23]. Очевидно, средняя сила тяжести p , действующая на осциллятор, зависит от энергии E его колебаний, при этом $p \propto \sqrt{E}$.

Массивное взвешиваемое тело можно представить как ансамбль подобных механических осцилляторов, связанных упругими силами межатомного взаимодействия и совершающих хаотические тепловые колебания, характеризуемые функцией распределения частот $g(\omega)$ [2]. При трехмерных тепловых колебаниях частицы тела испытывают значительные ускорения. Величина проекции мгновенных векторов ускорений на направление силы тяжести, аналогично (13), зависит от энергии тепловых колебаний частиц. В классическом приближении, при температурах выше температуры Дебая, энергия E осцилляторов пропорциональна абсолютной температуре T тела, следовательно, учитывая (12) и (13), полный вес P тела может быть представлен в виде

$$P = Mg_0 \left(1 - \frac{\alpha_{pc}}{\pi g_0} C \sqrt{T} \right), \quad (14)$$

где M — масса тела и C — постоянная, зависящая от физических свойств материала тела.

В предположении медленной частотной зависимости амплитуд колебаний частиц величина C связана с функцией $g(\omega)$ распределения частот тепловых колебаний:

$$C = C_m \frac{\int_0^{\omega_c} g(\omega) \omega^2 d\omega}{\int_0^{\omega_c} g(\omega) d\omega}, \quad (15)$$

где ω_c — максимальная частота колебаний и C_m — коэффициент, зависящий от плотности и упругих свойств материала тела. Из (14) и (15) следует, что температурная зависимость веса тела определяется, в основном, высокочастотной составляющей распределения $g(\omega)$. Относительное изменение $\Delta P/P$ веса тела, нагретого от температуры T до $T + \Delta T$, удобно представить в виде

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{a \Delta T}{2\sqrt{T}}, \quad (16)$$

где $a = \alpha_{pc} C / \pi g_0$ и $\Delta T \ll T$. При последнем условии, очевидно, приращения ΔP и ΔT прямо пропорциональны и величина постоянной a может быть оценена при точном взвешивании нагреваемых образцов пробных тел.

6.2. ЭКСПЕРИМЕНТ

Основными причинами влияния температуры на результаты высокоточных взвешиваний тел являются: тепловое расширение тел, температурное изменение намагниченности взвешиваемого образца, температурное изменение адсорбции

влаги поверхностью образца, температурное изменение плотности окружающего образец воздуха (изменение плавучести), температурная конвекция воздуха вблизи поверхности образца, влияние нагретого образца на механизм весов (посредством теплового излучения, теплопроводности или конвекции). Перечисленные факторы достаточно хорошо изучены в современной измерительной технике, и их вклад в результаты измерений масс образцов может быть оценен количественно.

Нами выполнены эксперименты по взвешиванию металлических стержней из немагнитных материалов в процессе их нагревания стоячей либо бегущей ультразвуковой волной [10]. Ультразвуковой метод возбуждения изначально был выбран с целью создать ориентированные вдоль определенного направления (оси стержня) колебания частиц тела. Длина звуковой волны в стержнях в несколько раз превышала их диаметр, что обеспечивало преимущественно продольные моды упругих колебаний в цилиндрических образцах [6]. Ультразвуковые волны возбуждались пьезоэлектрическим преобразователем, закрепленном на торце стержня; использовался цилиндрический преобразователь диаметром 12 мм и высотой 9 мм, изготовленный из пьезокерамики типа ЦТС. Металлический стержень и преобразователь были установлены в специальной оправе и поддерживались с торцов прокладками из пенопласта, обеспечивающими высокий коэффициент отражения акустических волн на границах сборки. Электрический сигнал к контактам преобразователя внутри ящика весов подводился легкими медными проводниками длиной 150 мм и диаметром 85 мкм; дополнительная нагрузка от проводников на чашки весов была незначительна и исключалась благодаря калибровке весов, проводимой перед каждым взвешиванием.

Взвешивание держателя с установленными в нем образцами производилось на аналитических весах марки АДВ-200. Температура в верхнем и нижнем участках витрины весов контролировалась с точностью до $0,1^{\circ}\text{C}$; вертикальный градиент температуры в закрытой витрине весов находился в пределах 0,2–0,8 град/м. При измерениях коромысло весов совершало медленно затухающие колебания с периодом 15–17 с, отсчеты показаний весов (элонгации) непрерывно фиксировались;

результатирующая погрешность измерений масс образцов не превысила 50 мкг.

Резонансная акустическая система, включающая исследуемый образец и пьезопреобразователь, была чувствительной к изменениям частоты подводимого электрического сигнала. Режим стоячей волны и сопутствующий ему эффективный объемный нагрев стержня устанавливался по минимальному уровню U напряжения на выходе генератора при подключении к нему нагрузки (пьезопреобразователя); напряжение U_0 на разомкнутом выходе генератора равнялось 100 или 150 В.

Типичная экспериментальная зависимость изменения массы взвешиваемого образца от времени ультразвукового прогрева стержня показана на рис. 5.

Зависимость температуры участка поверхности образца от времени действия ультразвука измерялась в отдельных экспе-

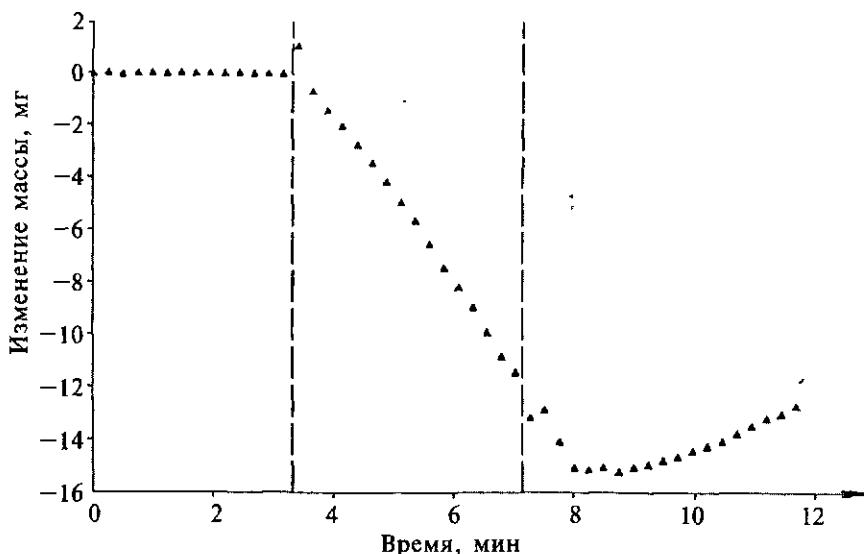


Рис. 5. Изменение массы латунного стержня, установленного в открытом держателе. Частота ультразвукового сигнала — 131,25 кГц. Штриховые линии соответствуют включению и выключению ультразвука

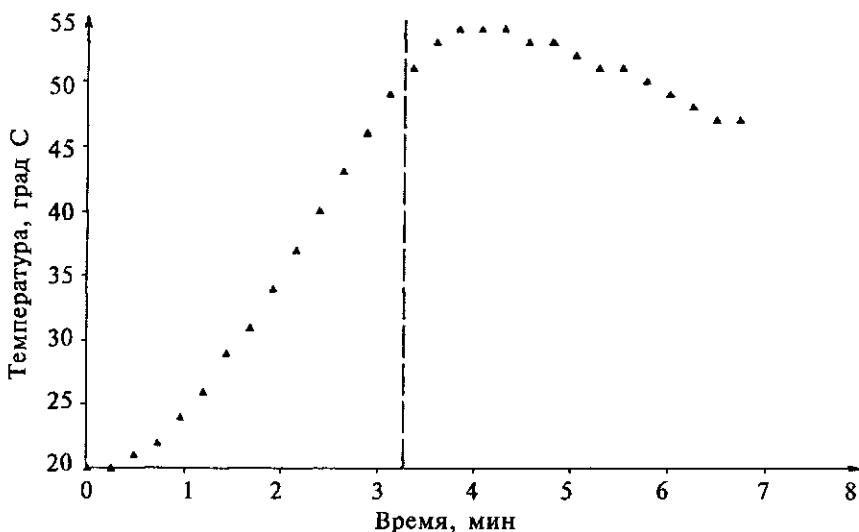


Рис. 6. Временная зависимость температуры участка поверхности стержня из латуни, нагреваемого ультразвуком (открытый держатель). Частота ультразвукового сигнала — 131,28 кГц. Штриховая линия соответствует выключению ультразвука

риментах в тех же условиях, что и при взвешивании, на частоте резонанса; пример такой зависимости показан на рис. 6.

В поле стоячей акустической волны распределение температуры в объеме стержней является периодически неоднородным. Скорость выравнивания температуры в объеме стержня определяется теплопроводностью его материала и условиями теплообмена на границах стержня. Характерно, что в зависимости от условий теплообмена на его поверхности рост температуры значительной массы стержня происходит некоторое время и после выключения ультразвука.

Для исключения влияния тепловой конвекции на результаты измерений проведено взвешивание нагреваемого ультразвуком образца, установленного в герметически закрытом контейнере (дьюаре) (рис. 7).

Соответствующая зависимость изменения массы контейнера от времени нагрева образца приведена на рис. 8.

В результате экспериментов определена максимальная скорость $\Delta m / \Delta t$ изменения массы контейнера с образцом в те-

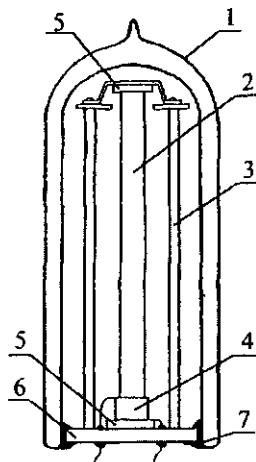


Рис. 7. Устройство герметического контейнера:
1 — дьюар; 2 — металлический стержень; 3 — стойка держателя (текстолит); 4 — пьезопреобразователь; 5 — прокладки (пено-пласт); 6 — основание держателя (эбонит); 7 — холодная сварка

чение времени нагрева образца и максимальная скорость изменения температуры $\Delta T / \Delta t$ образца. Полагая, что полученные значения параметров $\Delta m / \Delta t$ и $\Delta T / \Delta t$ близки к параметрам равномерно прогретого массивного стержня, рассчитано относительное изменение γ кажущейся массы образца при измене-

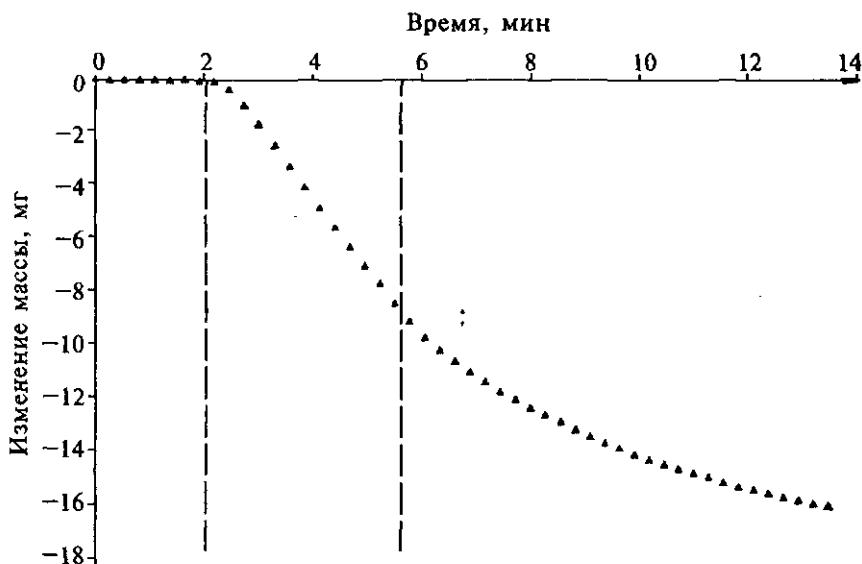


Рис. 8. Изменение массы латунного стержня, установленного в закрытом дьюаре. Частота ультразвукового сигнала — 131,27 кГц. Штриховые линии соответствуют включению и выключению ультразвука

нии температуры на 1 К, $\gamma = \frac{\Delta m}{(m\Delta T)}$. В данном расчете не учите-

тывались температурные изменения массы пьезопреобразователя, поскольку величина его массы намного меньше масс исследуемых металлических образцов. Характеристики исследованных образцов и результаты расчетов параметра γ приведены в таблице 1.

Таблица 1
Характеристики образцов и результаты измерений

Материал	Длина, мм	Диаметр, мм	Масса, г	Частота уз, кГц	U_0 / U В/В	$\Delta m / \Delta t$ мг/мин	$\Delta T / \Delta t$ град/мин	$\gamma, \times 10^{-6}$ град $^{-1}$	Внешние условия
Свинец	80,2	8,0	45,6	135,43	100/92	1,06	5,1	4,6	в воздухе
Медь*	71,6	10,5	39,2	129,68	100/60	1,08	4,0	6,9	в воздухе
Медь*	71,6	10,5	39,2	129,70	100/60	1,15	4,5	6,5	теплоизоли-рованный
Латунь	140,0	8,0	58,5	131,25	150/140	3,43	11,6	5,0	в воздухе
Латунь	140,0	8,0	58,5	131,27	150/130	2,64	10	4,5	в дьюаре
Дюралию-миний	140,0	8,0	19,1	134,90	150/140	1,66	7,5	11,6	в воздухе

* Жгут.

Разброс экспериментальных значений γ , полученных для одинаковых материалов стержней, объясняется неидентичностью условий их нагревания и неточностью оценок средней температуры в объеме образца.

Использованный в экспериментах медный образец был выполнен в виде жгута склеенных эпоксидным kleem медных проволок диаметром 0,8 мм. Этим достигалось лучшее подавление нежелательных радиальных мод колебаний стержня. Для изучения влияния тепловой конвекции медный образец помещался в теплоизолятор (стержень закрывался теплоизоляционным материалом). Остальные образцы были изготовлены в виде монолитных цилиндров с высоким качеством обработки поверхностей.

Измерения массы нагреваемых ультразвуком образцов стержней выполнялись при их вертикальной и горизонтальной ориентациях. В горизонтальном положении относительное температурное изменение γ массы образца, как правило, было меньше, чем при вертикальной ориентации стержня. Несовпадение соответствующих значений γ , по-видимому, было связано с расстройкой акустического резонанса, вызванной изменением положения держателя, и изменением температуры образца из-за изменения режима теплообмена у его поверхности.

Эксперименты показали, что во всех исследованных образцах материалов наблюдается одна и та же закономерность — заметное уменьшение массы стержней при их нагревании ультразвуком. Временная зависимость $\Delta m(t)$ изменения масс образцов при их ультразвуковом нагреве примерно соответствует временной зависимости $\Delta T(t)$ изменения температуры образцов (см. рис. 5 и 6), то есть выполняется прямая пропорциональность величин приращений Δm и ΔT . Изменение во времени массы образца, нагреваемого в герметически закрытом дьюаре, в котором в условиях высокой теплоизоляции нагретого тела изменение температуры стержня после выключения ультразвука происходит медленнее (см. рис. 8), подтверждает это заключение.

Из перечисленных выше возможных причин кажущегося изменения массы нагретого образца наиболее существенная — тепловая конвекция, обусловленная разностью температур поверхности взвешиваемого стержня и воздуха в витрине весов. Этот аспект подробно проанализирован в работе [40], согласно которой обусловленное конвекцией кажущееся изменение массы стержня диаметром 8 мм и длиной 140 мм на величину, например, 10 мг достигается при разности температур поверхности стержня и воздуха более 800°C . Очевидно, тепловая конвекция не может быть причиной большого, до 15–16 мг, изменения массы образцов, наблюдавшегося в описываемых экспериментах. Близость значений γ , рассчитанных по результатам взвешивания латунного образца в открытом держателе и в дьюаре, подтверждает это заключение.

Другими возможными причинами зависимости измеряемой массы образцов от температуры могут быть особенности тепломассобмена в ультразвуковом поле вблизи образца, акустические течения, действие тепла и ультразвука на механизм весов. Эти факторы оказывают влияние на результаты взвешивания, однако такое влияние невелико и должно носить выраженный случайный характер. При имевших место в описываемых экспериментах относительно небольших уровнях мощности ультразвука и температуры измерений указанные ультразвуковые эффекты не объясняют наблюдаемое в опытах регулярное, устойчивое и значительное по величине температурное уменьшение масс образцов. Характерно, что изменение масс образцов происходит сравнительно долгое время и после выключения ультразвука, что подтверждает определяющую роль температуры тел в рассматриваемых явлениях.

С учетом сказанного есть основания предположить, что причиной наблюдаемого изменения массы нагретых ультразвуком металлических образцов является температурная зависимость силы тяготения. Температурное относительное изменение $\Delta m/m$ кажущейся массы образца удовлетворительно описывается формулой (16), полагая в ней $\Delta P/P = \Delta T/T$; соответствующие экспериментальные значения коэффициентов a приведены в таблице 2.

Обстоятельство, что эти коэффициенты минимальны для тяжелых и вязких материалов (свинец) и принимают большие значения для легких упругих сред (дюралюминий), согласуется с физическим смыслом по-

стоянной C_m в формуле (15).

Тот факт, что изменение ориентации стержня с возбужденной в нем продольной акустической волной не приводит к нулевому эффекту $\gamma = 0$, указывает на преобладающую роль при изменении массы образца именно высокочастотных тепловых колебаний составляющих его частиц, характеризуемых рас-

Таблица 2
Экспериментальные
значения
коэффициента a

Материал	$a, \times 10^{-4}, K^{-1/2}$
Свинец	1,6
Медь	2,2; 2,4
Латунь	1,5; 1,7
Дюралюминий	4,0

пределением $g(\omega)$. На ориентационную зависимость коэффициента a в большей степени влияет анизотропия распределения $g(\omega)$, свойственная монокристаллическим средам (см. раздел 6.4). Сравнительно низкочастотные акустические колебания в стержне при больших амплитудах также могут давать заметный вклад в изменение массы образца, особенно при резонансе колебаний, когда амплитуда колебаний $A(\omega)$ максимальна.

6.3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотренные процессы температурного изменения веса нагреваемого и охлаждаемого стержня можно описать на основе простой теплофизической модели. В ней ограничимся рассмотрением процессов нагревания и охлаждения стержня, находящегося в тепловом контакте с нагревателем и расположенного непосредственно у торца стержня. Представим формулу (14) в виде

$$P(T) = P_0(1 - a\sqrt{T}), \quad (17)$$

где a — температурный коэффициент, зависящий от физических характеристик материала тела. Если плотность $\rho(r, t)$ и температура $T(r, t)$ в объеме тела неоднородны и изменяются во времени, зависимость $P(t)$ веса тела принимает вид интеграла, вычисляемого по всему объему тела:

$$P(t) = P_0 - ag_0 \int \rho(r, t) \sqrt{T(r, t)} d^3r. \quad (18)$$

Изменение во времени кажущейся массы нагреваемого и охлаждаемого стержня математически выражается известными решениями уравнений теплопроводности [18, 21]. Нагревание металлического стержня, к торцу которого присоединен пьезокерамический преобразователь, в значительной степени происходит вследствие передачи тепла от нагретого преобразователя к стержню. В первом, сравнительно грубом, приближении будем считать, что температура $T_c = T(0, t)$ конца стер-

жня постоянна, а температура окружающей среды равна T_0 . Тогда зависимость температуры $T(x, t)$ длинного тонкого стержня от координаты и времени будет иметь вид:

$$T(x, t) = T_0 + 0,5(T_c - T_0) \left[\exp\left(-x\sqrt{\frac{2H}{KR}}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2}\sqrt{\kappa t} - \sqrt{\frac{2H\kappa t}{KR}}\right) + \exp\left(x\sqrt{\frac{2H}{KR}}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2}\sqrt{\kappa t} + \sqrt{\frac{2H\kappa t}{KR}}\right) \right], \quad (19)$$

где R — радиус стержня; H — коэффициент теплообмена на боковой поверхности стержня; K — коэффициент теплопроводности; κ — коэффициент температуропроводности.

Расчетные зависимости $T(x, t_i)$ при разных длительностях t_i нагрева стержня и при значениях параметров, входящих в (19), в системе единиц СИ равных: $R = 0,004$, $K = 110$, $\kappa = 0,000034$, $T_0 = 300$, $T_c = 380$, приведены на рис. 9.

Полагая $\rho(r, t) = \rho \approx const$, получаем формулу, описывающую изменение кажущейся массы $M(t)$ стержня длиной $l \gg R$ в одномерном приближении:

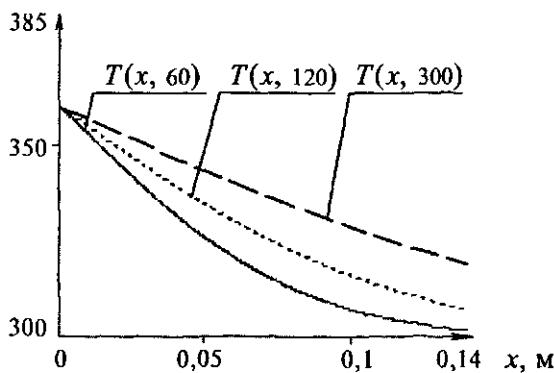


Рис. 9. Распределение температуры по длине стержня для трех значений времен нагревания

$$M(t) = M_0 - a \rho \pi R^2 \int_0^l \sqrt{T(x, t)} dx, \quad (20)$$

где $M_0 = \rho \pi R^2 l$.

Результаты расчета временной зависимости массы нагреваемого металлического стержня при $l = 0,14$, $\rho = 8600$ и величине температурного коэффициента в данных (приближенных) оценках равной $a \approx 0,0005$, приведены на рис. 10.

Сравнивая теоретическую зависимость $M(t)$ с экспериментальными (см. рис. 5 и 8) в период нагревания стержня, видно, что в начале нагрева экспериментальная и расчетная зависимости заметно различаются. Это объясняется тем, что температура нагревателя на самом деле не была постоянной (как принято в расчете), а после включения источника тепла возрастила. Тем не менее, общая тенденция монотонного уменьшения кажущейся массы стержня при его нагревании очевидна.

Для расчета изменения веса остывающего стержня воспользуемся также одномерным решением задачи определения

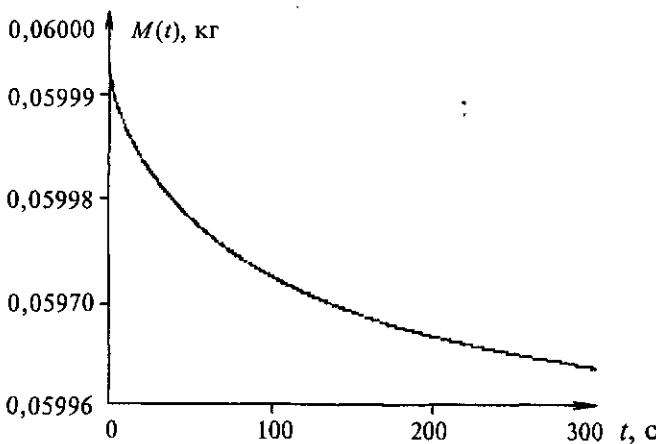


Рис. 10. Расчетная временная зависимость кажущейся массы нагреваемого стержня

температуры $T'(x, t)$ стержня, имеющего теплоизолированные концы, постоянный теплообмен на поверхности и заданную начальным распределением $f(x)$ температуру по длине стержня:

$$T'(x, t) = T_0 + \frac{1}{l(\exp(-\nu t))} \int_0^l f(x') dx' + \\ + \frac{2}{l} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\nu t - \frac{\kappa n^2 \pi^2 t}{l^2}\right) \cos\left(\frac{n\pi x}{l}\right) \int_0^l f(x') \cos\left(\frac{n\pi x'}{l}\right) dx', \quad (21)$$

где $\nu = 2H/c\rho R$; c — удельная теплоемкость материала стержня.

Приняв в (21) $f(x') = T(x', t_1) - T_0$, где t_1 — время нагрева стержня, и подставив это выражение в (20), была рассчитана временная зависимость $M'(t)$ кажущейся массы остивающего стержня. Результаты этих вычислений при разных значениях коэффициента теплообмена H приведены на рис. 11 и 12.

На рис. 11 характерно наличие минимума на временной зависимости кажущейся массы стержня, что и наблюдается в эксперименте при взвешивании стержня с открытой боковой

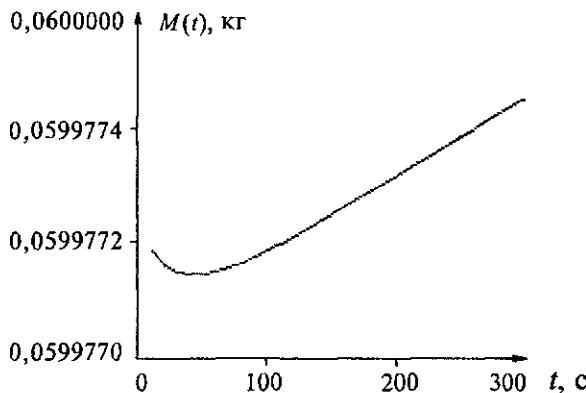


Рис. 11. Расчетная временная зависимость кажущейся массы остивающего стержня с открытой боковой поверхностью ($H = 0,5$)

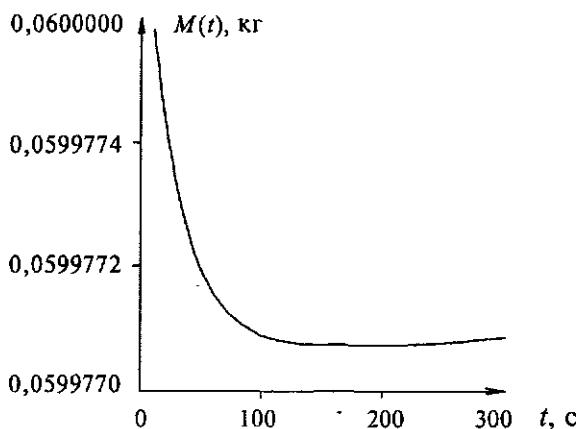


Рис. 12. Расчетная временная зависимость кажущейся массы остывающего стержня, помещенного в теплоизолятор ($H = 0,01$)

поверхностью (см. рис. 5). Если теплообмен на поверхности стержня незначителен, что соответствует измерениям веса стержня, помещенного в дьюар, кривая изменения веса стержня принимает монотонный характер на достаточно большом отрезке времени. Это также качественно согласуется с экспериментальными результатами (см. рис. 8). Количественное соответствие расчетных и экспериментальных данных может быть достигнуто при более полном описании режимов нагревания и остывания стержней, в том числе с учетом теплообмена на торцах стержня, трехмерного распределения температуры в объеме стержня и с учетом влияния тепловыделения в объеме стержня при поглощении ультразвука.

Итак, простая одномерная модель температурного изменения кажущейся массы стержня удовлетворительно описывает результаты экспериментов. Это подтверждает справедливость физических положений, на которых основана температурная зависимость веса тел.

6.4. АНИЗОТРОПИЯ ВЕСА КРИСТАЛЛА

Следствием температурной зависимости веса тел должно быть влияние ориентации анизотропного кристалла на его вес [13]. В анизотропных средах упругие постоянные и спектры ча-

стот тепловых колебаний частиц для различных i -х направлений в кристалле могут существенно различаться, что влечет за собой и различие соответствующих этим направлениям коэффициентов взаимодействия a_i . Например, для простого механического осциллятора массой μ и с коэффициентом упругости c_i , совершающего вертикальные гармонические колебания, величина коэффициента взаимодействия пропорциональна $\frac{\sqrt{2c_i}}{\mu}$ (см. (12) и (13)).

Представив кристаллическое тело ансамблем подобных периодически расположенных и связанных упругими силами осцилляторов и учитывая, что скорость V_i упругих продольных волн в кристалле пропорциональна

$\sqrt{\frac{c_i}{\mu}}$ [24], следует предположить линейную зависимость

$$a_i \propto \frac{V_i}{\sqrt{\rho}}, \text{ где } \rho \text{ — плотность материала.}$$

В действительности спектр частот и характер упругих тепловых колебаний атомов (ионов) в кристаллах намного сложнее, и их описание должно включать рассмотрение как акустических, так и высокочастотных оптических фононов. Поэтому направления в кристалле, для которых коэффициенты взаимодействия a_i существенно отличаются, могут не совпадать с направлениями неодинаковых скоростей упругих продольных волн. Тем не менее, вероятно различие весов P_1 и P_2 кристалла, измеряемых в положениях $\vec{V}_1 \parallel \vec{g}_0$ и $\vec{V}_2 \parallel \vec{g}_0$, где \vec{V}_1 и \vec{V}_2 — векторы, соответственно, наибольшей и наименьшей скоростей продольных волн в кристалле. При этом относительная величина γ_{12} измеряемой разности масс кристалла равна

$$\gamma_{12} = \frac{P_1 - P_2}{P_0} = -(a_1 - a_2)\sqrt{T}, \quad (22)$$

где a_1 и a_2 — коэффициенты взаимодействия упругих и гравитационных сил для направлений V_1 и V_2 .

В эксперименте использован образец кристалла рутила (TiO_2) размерами $6,2 \times 7,7 \times 14,1$ мм и массой около 2,876 г. Ось Z ([001]) кристалла составляет угол 14° относительно нормали \vec{n}_1 к грани кристалла размером $6,2 \times 14,1$ мм; скорость V_1 продольных упругих волн в направлении Z равна $10,94 \cdot 10^3$ м/с. Ось X ([100]) также расположена под углом 14° относительно нормали \vec{n}_2 к грани размером $6,2 \times 7,7$ мм; скорость V_2 продольных волн в направлении X равна $8,014 \cdot 10^3$ м/с [1]. Взвешивание образца в положениях $\vec{n}_1 \parallel \vec{g}_0$ и $\vec{n}_2 \parallel \vec{g}_0$ производилось на компараторе марки C5S фирмы Sartorius при нормальных значениях температуры, давления и влажности воздуха. Дискретность отсчетов компаратора 0,1 мкг, среднеквадратическое отклонение (СКО) — 0,2 мкг. Отдельные значения измеряемой разности масс $\Delta m = m_1 - m_2$ образца определялись на основе четырех отсчетов при изменениях ориентации «1» и «2» образца в последовательностях «1212» и «1221». Экспериментальные значения разности масс Δm , полученные в четырех сериях измерений и выполненные в разные дни, приведены на рис. 13.

По этим данным среднее значение разности масс кристалла равно 0,20 мкг при СКО среднего 0,10 мкг; соответствующая относительная величина разности масс $\gamma_{12} \approx 7 \cdot 10^{-8}$

Статистический анализ показывает, что распределение случайных значений разности масс Δm близко к нормальному. Коэффициент распределения Стьюдента для данной серии измерений составляет около 2,20, что при доверительной вероятности 0,90 соответствует доверительной границе случайной погрешности измерений среднего значения Δm , равной 0,22 мкг. Для повышения точности измерений необходимо увеличить число измерений и обеспечить высокостабильные, особенно температурные, условия взвешивания.

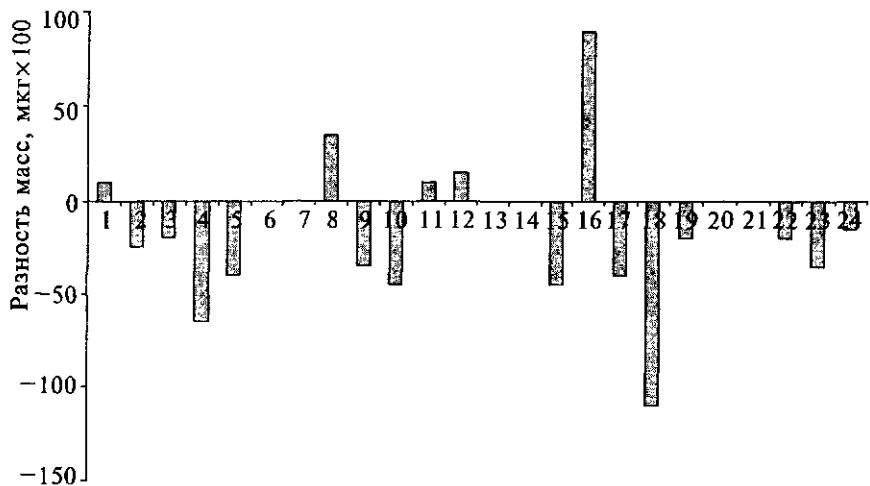


Рис. 13. Разность масс Δm образца кристалла рутила, измеренная при двух взаимно-перпендикулярных положениях оптической оси кристалла относительно вертикали

Значительные, превышающие СКО компаратора флюктуации измеряемой величины разности масс, по-видимому, объясняются нестабильностью температуры взвешиваемого образца, обусловленные флюктуациями температуры воздуха в помещении и тепловыми помехами при переориентации образца. Предположим, что среднее значение коэффициента a взаимодействия для кристалла рутила по порядку величины близко к $10^{-3} K^{-\frac{1}{2}}$, то есть к величине коэффициента a для легких упругих металлов. При этом флюктуации температуры образца величиной $0,01^\circ C$ в окрестности $T = 293 K$ обусловливают, согласно (17), флюктуации измеряемого значения массы образца величиной около 1 мкг .

Итак, эксперимент показал неравенство весов анизотропного кристалла рутила, измеренных при различных ориентациях его кристаллографических осей относительно вертикали. Отрицательный знак наблюдаемой разности масс Δm образца соответствует неравенству скоростей $V_1 > V_2$ продольных упругих волн в кристалле и согласуется с (17) и (22).

7. ЛАЗЕРНЫЕ АНАЛОГИИ В ГРАВИТАЦИИ

Четыре описанных выше эксперимента — взвешивание ротора механического гироскопа с горизонтальной осью вращения, измерение коэффициентов восстановления при горизонтальном и вертикальном ударах шара о плиту, температурная зависимость веса металлических стержней и анизотропия веса кристалла рутила — согласуются между собой и подтверждают неравенство нулю коэффициентов α_c и α_p взаимодействия упругих и гравитационных сил. Эти эксперименты, в которых использовались пробные тела макроразмеров, в сущности, являются наиболее простыми лабораторными исследованиями глубокой связи гравитационных и электромагнитных взаимодействий, основанной на концепции «материальной», а не «геометрической» природы сил тяготения. Дальнейшее развитие феноменологического подхода в исследовании гравитации выдвинет на первый план проблему поиска гравитационных аналогов физических процессов и явлений, известных, например, в оптике и радиофизике. Особого внимания заслуживают процессы когерентного возбуждения активных сред и усиления в них электромагнитного излучения. Гравитационный аналог оптического усилителя, или лазера, мог бы стать устройством, в котором увеличение либо уменьшение силы гравитации, действующей на тела макроразмеров, достигало бы вполне заметной величины (общая идея создания гравитационного аналога лазера — «газера» — впервые была выдвинута Бриллюэном [4]).

Сегодня, при ограниченном объеме экспериментальных данных о характере и функциях взаимодействия электромаг-

нитных и гравитационных сил, еще невозможно детально представить механизм внешнего воздействия на материальную среду, который обусловил бы значительное изменение ее полного веса. Но представляется несомненным, что такое «возбуждение» среды должно обеспечиваться упорядоченным ускоренным движением составляющих среду материальных частиц, подобным тому, которое возникает при распространении в среде упругих (акустических) волн. При этом изменение веса тела будет происходить как следствие распространения в его объеме акустических или оптических фононов, вообще говоря, сложного спектрального состава. Полезную роль в анализе гравитационных явлений должны сыграть динамические аналогии, заимствованные из атомной и лазерной физики. Так, рассмотренное выше изменение силы тяжести под действием упругой (электромагнитной) внешней силы ассоциируется с изменением потенциальной энергии взвешиваемого пробного тела, аналогичным переходу атома в более высокое или низкое возбужденное энергетическое состояние (рис. 14).

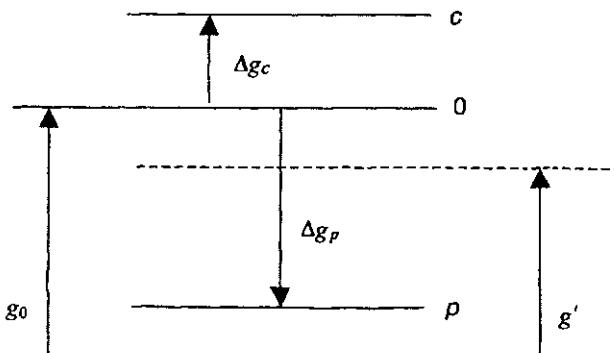


Рис. 14. Диаграмма, иллюстрирующая изменения ускорения силы тяжести, пропорционального потенциальной энергии частицы в гравитационном поле Земли:

g_0 — нормальное ускорение; Δg_c и Δg_p — изменения ускорения силы тяжести под действием внешних негравитационных сил, направленных навстречу (c) и вдоль (p) вектора силы тяжести; g' — среднее значение ускорения силы тяжести при гармонических колебаниях частицы

Обеспечив упорядоченное (когерентное, резонансное) возбуждение высоких либо низких уровней потенциальной энергии одновременно для большого числа материальных частиц, составляющих пробное тело, принципиально можно получить значительный макроэффект изменения веса пробного тела. «Лазерный эффект» в гравитации характеризуется тем, что число частиц тела («населенность») в состояниях s или p (см. рис. 14) существенно выше, чем на уровне 0.

Как отмечалось, причиной изменения сил гравитации является ускоренное движение частиц тела под действием сторонних упругих (электромагнитных) сил, поэтому исследования в области «гравитационной спектрометрии», прежде всего, должны быть связаны с высокоточными измерениями веса тел при возбуждении в них ультразвуковых либо гиперзвуковых колебаний. При этом нельзя не учитывать то обстоятельство, что наиболее интенсивный «отклик» материальной среды на внешнее возмущение может быть не просто «резонансным» по природе, но импульсным, аналогичным отклику радиоэлектронного или оптического согласованного фильтра на подводимый сигнал сложной формы [17].

Общая функциональная зависимость изменения Δg ускорения силы тяжести от ускорения a , обусловленного действием внешних негравитационных сил, может содержать нелинейные составляющие и функции координат z рассматриваемой точки наблюдения, например,

$$\Delta g = \alpha a + \beta a^2 + \dots + a(pz' + qz^2 + \dots). \quad (23)$$

Входящие в уравнение (23) коэффициенты α , β , p и q зависят от направления вектора ускорения внешних сил относительно вектора ускорения силы тяжести и при гармонических воздействиях на среду могут являться функциями частоты ω упругих колебаний (наиболее интересны резонансные зависимости $\alpha(\omega)$ и $\beta(\omega)$). Выражение в круглых скобках в (23) учитывает фактор возможного коллективного гравитационного взаимодействия частиц среды. В частности, при ненулевых p и q из (23) следует зависимость силы тяжести, действующей

на протяженное тело (например, стержень), от его пространственной ориентации (такая зависимость может быть причиной экспериментально наблюдаемого в динамических измерениях небольшого различия веса вертикально и горизонтально ориентированного немагнитного стержня [11]).

Подобно тому как появлению лазера предшествовало накопление многочисленных экспериментальных и теоретических данных в области оптической спектроскопии, новая физика гравитации на пути создания гравитационного аналога лазера должна пройти трудоемкую стадию экспериментальных исследований взаимодействий упругих и гравитационных сил различных материалов и их композиций при различных условиях и режимах внешних (механических, акустических, электромагнитных, температурных и др.) воздействий.

8. АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Температурная зависимость силы тяготения, подтвержденная экспериментально как косвенными механическими, так и прямыми температурными измерениями, дает основания предложить следующую уточненную форму закона тяготения, в которой принята во внимание температура взаимодействующих тел:

$$F_{12} = G_0 \frac{m_1 m_2}{r^2} (1 - a_1 \sqrt{T_1}) (1 - a_2 \sqrt{T_2}), \quad (24)$$

где G_0 — гравитационная постоянная; T_1 и T_2 — абсолютные температуры взаимодействующих масс (m_1 , m_2), превышающие температуру Дебая; и a_1 , a_2 — их соответствующие температурные коэффициенты. Закон тяготения в форме (24) не противоречит известным экспериментальным фактам классической механики и ее обширным приложениям в гравиметрии и астродинамике: высокоточные измерения сил гравитации всегда сопровождались строгой стабилизацией температуры взаимодействующих тел. Различие абсолютных температур пробных масс в этих измерениях, по-видимому, является причиной наблюдаемого разброса экспериментальных значений гравитационной постоянной, значительно превышающего точность проводимых измерений [43].

Зависимость силы тяготения F_{12} от температуры тел необходимо принимать во внимание в гравиметрии и метрологии

гии при определении точных абсолютных величин масс тел. Рассмотрим некоторые астрофизические и астродинамические явления, для которых существенны температурные поправки к закону тяготения.

Движение перигелиев планет. Медленное изменение средней температуры планеты вследствие лучистого теплообмена на ее поверхности либо вследствие внутренних тепловых процессов в ее объеме изменяет силу тяготения, действующую на планету со стороны Солнца. Следствием этого будет прецессия эллиптической орбиты (движение перигелия) планеты.

Движение планет описывается как решение задачи Кеплера [32] с гравитационным потенциалом U вида

$$U = -\frac{\alpha}{r}, \quad (25)$$

где $\alpha = Gm_0$ (G — гравитационная постоянная; m_0 — масса Солнца).

Если средние температуры планеты T_1 и Солнца T_0 медленно изменяются во времени, то такие изменения, согласно (24), можно описать как изменения гравитационной постоянной,

$$G(t) = G_0(1 - a_1\sqrt{T_1(t)})(1 - a_0\sqrt{T_0(t)}) \quad (26)$$

или, в первом приближении,

$$G(t) = G_0(1 + kt), \quad (27)$$

где коэффициент k равен

$$k = -\frac{1}{2} \left(\frac{a_1}{\sqrt{T_1}} \frac{dT_1}{dt} + \frac{a_0}{\sqrt{T_0}} \frac{dT_0}{dt} \right). \quad (28)$$

С учетом (27) гравитационный потенциал принимает вид

$$U = -\frac{\alpha}{r} + \delta U, \quad (29)$$

где неильтонова добавка δU равна

$$\delta U = -\frac{\alpha k t}{r}, \quad (30)$$

здесь $\alpha = G_0 m_0$.

Решение задачи о прецессии эллиптической орбиты планеты в поле тяготения с потенциалом, отличным от ньютона, известно [19]. Угловое смещение $\delta\varphi$ перицентра за один полный оборот планеты составляет

$$\delta\varphi = \frac{\partial}{\partial M} \left(\frac{2m}{M} \int_0^\pi r^2 \delta U d\varphi \right), \quad (31)$$

где M — момент количества движения планеты; m — ее масса; r, φ — полярные координаты.

Представляя решение задачи Кеплера в параметрическом виде, получаем:

$$r = a(1 - e \cos \xi), \quad (32)$$

$$t = \frac{P}{2\pi(\xi - e \sin \xi)}, \quad (33)$$

где a — большая полуось эллипса; e — эксцентриситет орбиты; $P = 2\pi \sqrt{\frac{ma^3}{\alpha}}$ — период обращения планеты).

Учитывая, что

$$M^2 = m \alpha a (1 - e^2) \quad (34)$$

и $d\xi \approx d\varphi$ (наиболее точно выполняется при $e \ll 1$), после подстановки (29), (32), (33) в (31) получим

$$\delta\varphi = \frac{\pi k P}{2(1 - e^2)}. \quad (35)$$

Согласно (35), при увеличении силы гравитационного взаимодействия планеты и Солнца (при $k > 0$), что возможно при их медленном остывании, эллиптическая орбита планеты

вращается в направлении ее движения (прямая прецессия). При увеличении средней температуры планеты большая полуось эллиптической орбиты планеты вращается в обратном направлении. Следовательно, непостоянство средних температур планет и Солнца является одной из причин движенияperiеллиев планет.

Например, для Меркурия ($e = 0,206$, $P = 0,241$ года) избыточная неильтоновская величина угловой скорости движения перигелия равна около 38 угловых секунд в столетие ($\delta\varphi = 4,56 \cdot 10^{-7}$ рад/оборот). На основе (35) получаем соответствующую величину коэффициента $k = 1,15 \cdot 10^{-6}$ год $^{-1}$ (если условно считать среднюю температуру Солнца T_0 постоянной). Ввиду неопределенности значений коэффициента a_1 и средней температуры T_1 планеты, дать обоснованную оценку скорости уменьшения средней температуры Меркурия пока затруднительно.

Изменение частоты двойного пульсара. Остыивание звезд, входящих в систему двойного пульсара, увеличивает силу их гравитационного взаимодействия. В результате период обращения этих звезд уменьшается, аperiастры их орбит смещаются.

Двойной пульсар представляет собой систему двух гравитационно взаимодействующих масс m_1 и m_2 , вращающихся вокруг центра инерции. Элементарное описание движения этих масс сводится к задаче движения одной из масс относительно неподвижной другой, при этом выполняется условие:

$$\frac{4\pi^2 a^3}{P^2} = G(m_1 + m_2), \quad (36)$$

где P — период вращения; a — большая полуось эллипса; G — гравитационная постоянная [32].

Изменение ΔG гравитационной постоянной, при сохранении полного момента количества движения двойной системы

мы, обусловливает изменение ΔP ее периода. Полагая, что $a \approx \text{const}$, получаем

$$\frac{\Delta P}{P} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta G}{G}. \quad (37)$$

Указанное изменение ΔG связано с изменениями ΔT_1 и ΔT_2 температур масс m_1 и m_2 . Поэтому относительное изменение периода равно

$$\frac{\Delta P}{P} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{a_1 \Delta T_1}{\sqrt{T_1}} + \frac{a_2 \Delta T_2}{\sqrt{T_2}} \right). \quad (38)$$

Согласно (38), медленное остывание масс m_1 и m_2 (звезд), например, вследствие лучистого теплообмена приводит к уменьшению периода двойного пульсара. Такое явление известно в астрофизике и, очевидно, с учетом нелинейной временной зависимости изменения периода пульсара может быть объяснено без привлечения гипотезы о генерации в двойной системе «гравитационных волн», до сих пор не наблюдавшихся [33].

Движение плазмы в солнечной короне. Вследствие высокой температуры плазмы в окрестностях Солнца сила притяжения ее частиц к Солнцу заметно отличается от следующей из классической формулы закона тяготения. Согласно (24), эффективная, по отношению к плазме, величина гравитационной постоянной G в окрестностях Солнца меньше ее стандартного значения. Неоднородность распределения температуры плазмы и, следовательно, эффективной величины G на разных расстояниях от Солнца должна влиять на общий характер движения плазмы в солнечной короне (движения солнечного ветра).

Черные дыры и переменные звезды. Температурная зависимость сил тяготения должна играть существенную роль в динамике крупномасштабных, в том числе взрывных, астрофизических процессов и в гравитационном коллапсе. Особый интерес теоретиков-астрофизиков, судя по обилию публикаций, вызывают сегодня черные дыры.

Черные дыры — гипотетические космические тела, образовавшиеся в результате гравитационного коллапса и сжавшиеся до столь малых размеров, что создаваемые этими телами силы гравитации не позволяют внешнему наблюдателю увидеть даже излучаемый «телами-дырами» свет. Существование черных дыр прямо следует из уравнений ОТО (хотя автор ОТО Эйнштейн отрицательно относился к их реальности, а выдающийся физик Фок вообще не желал верить в идею черных дыр [16]).

Отдавая должное добросовестным усилиям современных физиков-теоретиков, «на кончике пера» изучающих данную проблему, приведем два принципиальных возражения против существования черных дыр — познавательное и экспериментальное [8]. Во-первых, гипотеза черных дыр вступает в противоречие со здравым смыслом — понятием, хорошо знакомым физикам-экспериментаторам и в меньшей степени — теоретикам. Еще Бриллюэн справедливо отмечал: «Некоторые традиционные науки представляют собой странную смесь наблюдений и их интерпретации, основывающейся на отличных теориях, но экстраполируемой столь далеко за пределы условий эксперимента, что невольно настораживаешься и удивляешься: как часто желаемое выдается за действительное и тщательный анализ подменяется фантазированием. Приятно рассуждать о происхождении Вселенной, но надо помнить, что такие рассуждения — лишь чистая фантазия» [4]. Вообразить и математически описать объект, «заглатывающий» материю и излучение, конечно же, можно, но полагать, что несколько полученных сугубо теоретическим путем — даже очень красивых — математических уравнений отображают реальную картину развития гравитационного коллапса, довольно рискованно. Правда, в истории науки известны физические явления, первоначально вызвавшие неприятие со стороны здравого смысла, а позже ставшие вполне привычными (электромагнетизм, ядерная энергетика и др.). Но их отличительной особенностью было то, что исследователи имели дело с воспроизведенными, наблюдаемыми эффектами, допускавшими многократную экспериментальную проверку и потому бесспорно отнесенными к категориям физической реальности. Выполнялся восходящий еще к Галилею принцип «опыт — источник

знания», действовали все те методики и подходы, о которых верно сказал Менделеев: «...наука начинается там, где начинаются измерения». В общей теории относительности — теории тяготения — за основу принят иной, изначально аксиоматический, подход в описании явлений природы. Яркой иллюстрацией этого «нового» (а на деле — забытого «старого») подхода может служить утверждение видного физика-теоретика Уилла: «Вне зависимости от чьих-либо теоретических предубеждений надо признать, что тяготение, старейшее известное и во многих смыслах наиболее фундаментальное взаимодействие, само по себе практически не требует эмпирического обоснования» [33]. Столь глубокомысленные утверждения могут оказаться лишь своего рода наркотическое влияние на мышление физика: опыт больше не признается критерием истины.

Можно было бы придерживаться и часто высказываемой точки зрения, что общая теория относительности — одна из наиболее красивых физических теорий и уже потому правильная. Но и такое оригинальное суждение разделяется не всеми. «Красивое» не всегда означает «полезное», да и «верное». Например, как бы красиво ни сложилась шахматная партия, ее стратегические и тактические результаты совершенно бесполезны для военного дела. Не подобным ли образом общая теория относительности связана с физикой гравитации? Физическая теория лишь тогда жизнеспособна и полезна, если в ее основе лежат надежно установленные экспериментальные факты. Примером такой теории является электромагнитная теория Максвелла, основные уравнения которой — изящная форма записи экспериментально найденных закономерностей.

Считать убедительным доказательством реальности черных дыр, например, открытие компактных рентгеновских источников сомнительно: своеобразное излучение подобных источников может иметь и другие, не менее вероятные, физические причины.

Второе возражение против гипотезы черных дыр связано с температурной зависимостью силы тяжести. Известно, что гравитационный коллапс сопровождается увеличением температуры сжимаемого объекта. Согласно (24), силы тяготения зависят от температуры взаимодействующих тел — уменьшаются с ростом их абсолютной температуры. Это обстоятель-

ство необходимо принимать во внимание при рассмотрении процессов гравитационного сжатия космических объектов. При гравитационном коллапсе может наступить момент, когда силы гравитации уменьшатся настолько, что процесс сжатия замедлится и перейдет в фазу разлета (теплового взрыва) вещества. Вследствие охлаждения расширяющегося газа этот процесс может сопровождаться затухающими периодическими колебаниями плотности и температуры (светимости) вещества звезды, что, например, характерно для переменных звезд (цефеид). Возможно и монотонное изменение температуры и плотности сжимаемого силами гравитации вещества. Особенности такого крупномасштабного физического процесса могут быть описаны на основе его аналогии с классической архитектурной системой. Если температурная зависимость сил тяготения сохраняется и при формировании черных дыр, то, очевидно, возникновение подобной сингулярности представляется довольно сомнительным. Образованию черной дыры препятствуют силы давления со стороны коллапсирующего вещества, которые в определенный момент времени и при определенной температуре могут превзойти силы гравитационного сжатия.

Общая теория относительности отвергает предположение о практически заметной температурной зависимости сил гравитации как не соответствующее «слабому» принципу эквивалентности, лежащему в ее основе. Принцип эквивалентности в одной из своих формулировок утверждает независимость ускорения силы тяжести от физической природы материала пробного тела, на что действительно имеются экспериментальные основания (опыты Эйтвеша и др.). Но независимость ускорения силы тяжести от абсолютной температуры тела, характеризующей его внутреннее состояние, в принципе эквивалентности подразумевается в качестве бездоказательного постулата. Экспериментального обоснования независимости сил тяготения от температуры взаимодействующих тел нет. Наоборот, как и показано выше, имеются прямые экспериментальные свидетельства влияния температуры тела на испытываемую им силу тяжести.

9. О ПОЧТИ НЕВЕРОЯТНОМ: ПОЛЕТЫ НАЯВУ

Рассматривая возможности искусственного преодоления сил тяготения, было бы несправедливо оставить без внимания «совершенно несерьезный» вопрос о проявлении подобного феномена в живой природе. Правда, движение живых организмов лишь отчасти может быть объяснено известными законами химии, электромагнетизма и механики. Тем не менее, биологические и биофизические явления иногда способствовали развитию точных наук — достаточно вспомнить, что в первом устройстве измерения разности потенциалов в опытах Вольта использовалась препарированная лапка лягушки.

Штангист, поднимающий рекордный вес, мобилизует всю свою энергию и всю волю — фактор, не поддающийся научному — физическому — анализу. Происходит искусственное преодоление силы тяготения за счет биоресурсов организма в цепи сложных, связанных между собой электрических, электрохимических и механических взаимодействий.

Впечатляют многочисленные описанные в исторической литературе свидетельства потери веса и полетов человека без опоры о воздух. Эти явления в XX веке считались столь вздорными и ненаучными, что, к примеру, в подробных советских энциклопедических словарях (в отличие от солидных зарубежных изданий) просто отсутствовал термин «левитация» — вызванное волевым усилием уменьшение веса тела. Действительно, значительная часть свидетельств «полетов наяву», по-видимому, является плодами воображения и фантазии — слишком захватывала умы людей во все времена идея полета. Тем не менее, кратко рассмотрим возможное физическое истолкование фактов потери веса живыми организмами.

К относительно достоверным свидетельствам левитации и «полетов наяву» можно отнести описанные физиком Круксом опыты Юма, евангельские легенды о «хождении по водам», практикуемые в Европе в средние века взвешивания и опускания в воду подозреваемых в колдовстве женщин-«ведьм», необычайную легкость перемещения лунатиков, зафиксированное уменьшение веса психически возбужденных людей [14]. Общим для всех свидетельств было то, что теряющий вес человек всегда находился в состоянии высокого нервного напряжения или сильного испуга, транса, глубокого стресса. Если допустить, что в таком исключительном состоянии микрочастицы организма совершают своеобразное упорядоченное, сложное движение, сопровождающееся большими ускорениями микрочастиц вдоль вертикали, то с физической точки зрения (см. главу 7) значительное изменение веса такого сверхвозбужденного организма следует признать вероятным. Какие виды микрочастиц под действием сил электрической и электромагнитной природы совершают подобные движения, приводящие к изменению веса, что представляют собой фурьеспектр и характер этого ускоренного движения — предстоит узнать, скорее всего, в отдаленном будущем. Будет ли идея «полетов наяву» окончательно отвергнута или подтвердится и найдет полезное применение — решающий ответ на эти вопросы, в конечном счете, даст эксперимент.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя феноменологический подход в описании движения тел, мы рассмотрели принципиальную возможность физического изменения сил гравитации, действующих на тела лабораторных (а также космических) масштабов. Изменяемость сил тяготения, в сущности, обусловлена глубокой связью всех видов взаимодействий, включая гравитационное и электромагнитное взаимодействия. Ускоренное движение микрочастиц тела под влиянием электромагнитных сил изменяет силу гравитационного взаимодействия этих частиц с другими, условно неподвижными частицами. Эти изменения, в свою очередь, влияют на результаты высокоточного взвешивания тел. Зарегистрированные в лабораторных экспериментах изменения веса пробных тел — при температурном, колебательном, ударном воздействии на них — пока еще очень малы, но это обстоятельство не должно бескураживать внимательного исследователя. Вспомним, к примеру, что первые источники когерентного света — лазеры — обладали ничтожной мощностью. Потребовалось несколько десятилетий подробного изучения механизмов лазерной генерации, накопления опытных данных и прогресса в оптической технике, чтобы стало возможным лучом лазера разрезать металлические плиты. Нечто подобное может произойти и с управлением гравитацией, тем более что в этих исследованиях полезную роль могут и должны сыграть аналогии гравитационных и оптических явлений. Конкретные методы и способы управления гравитацией будут определены в результате получения и обработки данных высокоточных экспериментов, в которых проявляется себя изменяемость сил тяготения.

Явление гравитации, в том виде, в каком оно наиболее часто встречается в природе (притяжение Земли, лабораторных и космических тел), в известной степени, аналогично действию естественных — некогерентных — источников света и, скорее всего, этим далеко не исчерпывает всех своих физических особенностей. Подобно тому как в оптике возможна генерация нетеплового, когерентного излучения в активной (усиливающей) среде на основе лазерных механизмов излучения, гравитационное взаимодействие тел может зависеть от ускоренного движения составляющих тело частиц, обусловленного действием на них негравитационных (электромагнитных) сил. Гравитационным аналогом активной лазерной среды является тело макроскопических масштабов, частицы которого совершают коллективное (упорядоченное) ускоренное движение подобное тому, которое возникает при распространении в теле акустических (ультра- или гиперзвуковых) волн. В этих условиях гравитационное взаимодействие тел проявляет свойства, аналогичные лазерному излучению в оптике, в том смысле, что оно может существенно отличаться от классического ньютоновского взаимодействия. Детальное исследование характера таких гравитационных взаимодействий, создание и разработка методик их изменения и контроля, в перспективе, обеспечат решение, казалось бы неодолимой, проблемы «управления гравитацией».

Физика гравитации не сможет успешно и эффективно развиваться, пока не будет выполнен комплекс лабораторных экспериментов с пробными телами макроразмеров, в которых с высокой степенью достоверности подтвердится взаимосвязь гравитационных и электромагнитных полей. Выше приведены обоснования того, что подобные эксперименты, скорее всего, будут связаны с измерениями сил гравитации, приложенных к ускоренно движущимся телам, при этом такие ускорения должны быть связаны с внешними колебательными, ударными, температурными и акустическими воздействиями.

Отвечая на критику о противоречиях идеи управления гравитацией современным теориям тяготения, заметим, что физике несвойственно отдавать предпочтение только одному подходу, одной модели в истолковании наблюдаемых явлений. Монополизм одной теории рано или поздно оборачивается не-

разрешимыми парадоксами и застоем в развитии науки. Сегодня в теории гравитации наиболее широко известны полевой и геометрический подходы. Полевой подход, который можно в большей степени охарактеризовать как феноменологический, представляется и более рациональным, теснее связанным с экспериментом и создающим перспективы прогрессивного развития физики тяготения. Геометрический подход, основанный на умозрительных постулатах о специфических свойствах «пространства-времени», также заслуживает внимания и при всей своей математической громоздкости продолжает развиваться. Впрочем, в свете полученных экспериментальных результатов по температурной зависимости веса тел, по-видимому, потребуется внести уточнения в формулировку основополагающего в ОТО принципа эквивалентности.

Температурные поправки к закону всемирного тяготения без привлечения релятивистских концепций кривизны пространства-времени позволяют дать простое объяснение неильтоновским аномалиям движенияperiгелиев планет, уменьшения периода двойного пульсара. Можно предвидеть недовольство столь непочтительно-критическим отношением к ОТО со стороны ее многочисленных приверженцев, прежде всего теоретиков. Но вспомним, что выдающиеся ученые-«композиторы», как правило, не были сторонниками крайних мнений либо репрессий в отношении непривычных научных идей. Например, Менделеев писал: «Спокойная скромность суждений обыкновенно сопутствует истинно научному, а там, где хлестко и с судейскими приемами стараются зажать рот всякому противоречию, истинной науки нет, хотя бывает иногда и художественная виртуозность, и много ссылок на “последнее слово науки” [26]. Заслуживает внимания и такое пророческое высказывание Менделеева: «Если чего возможно достичь в понимании тяготения и тяжести, то, по моему мнению — не иначе и скорее всего путем точнейших взвешиваний и наблюдении колебаний, при них совершающихся» [27]. Заметим, что именно колебательное движение тел характеризуется бесконечным набором их ускорений (производных по времени любого порядка).

Прогресс физической науки непосредственно связан с экспериментом. В ближайшей перспективе в области управляемой

гравитации представляется необходимым проведение следующих лабораторных экспериментальных исследований. Во-первых, высокоточные исследования температурной зависимости веса различных материалов и их композиций в широком диапазоне температур. Во-вторых, динамические исследования веса тел в состоянии упругих возмущений — при акустическом (ультра- и гиперзвуковом) и ударном воздействиях на пробные тела, а также при их колебательном и вращательном движениях. В третьих, исследования сил взаимного притяжения ускоренно движущихся пробных масс различных размеров при крайне низких температурах. На основании экспериментальных результатов (возможно, при совместном воздействии на пробные тела внешних акустических и электромагнитных полей) будут разработаны способы получения «активных» гравитирующих сред.

Опыт развития физики показывает, что бесполезных экспериментов не бывает, лишь бы проводимые измерения выполнялись с достаточно высоким уровнем точности. Имеющийся сегодня объем экспериментальных результатов по управляемой гравитации, их взаимная согласованность, непротиворечивость по отношению к известным экспериментальным фактам классической физики, согласие теоретического обоснования наблюдаемых эффектов с данными астрофизики — все вместе взятое свидетельствует о том, что у этого нового направления физики тяготения есть будущее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акустические кристаллы / Под. ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1982. 632 с.
2. Ансельм А. И. Основы статистической физики и термодинамики. М.: Наука, 1973. 424 с.
3. Богородский А.Ф. Всемирное тяготение. Киев: Наукова думка, 1971. 352 с.
4. Бриллюэн Л. Новый взгляд на теорию относительности. М.: Мир, 1972. 144 с.
5. Гольдсмит В. Удар. М.: ИЛ, 1965. 448 с.
6. Дейвис Р. М. Волны напряжения в твердых телах. М.: ИИЛ, 1961.
7. Дмитриев А. Л. // Известия ВУЗ «Физика». 2001. № 12. С. 65–69.
8. Дмитриев А. Л. // Поиск. 2003. № 39 (749). С. 7.
9. Дмитриев А. Л. // Прикладная механика. 2002. Том. 38. С. 124–126.
10. Дмитриев А. Л., Никущенко Е. М., Снегов В. С. // Измерительная техника. 2003. № 2. С. 8–11.
11. Дмитриев А. Л., Снегов В. С. // Измерительная техника. 1998. № 5. С. 22–24.
12. Дмитриев А. Л., Снегов В. С. // Измерительная техника. 2001. № 8. С. 33–35.
13. Дмитриев А. Л., Чесноков Н. Н. // Измерительная техника. 2004. № 9. С. 36–37.
14. Дьяченко Г. Область таинственного. М.: Планета, 1992. 742 с.
15. Иваненко Д., Сарданашвили Г. Гравитация. Киев: Наукова думка, 1985. 200 с.

16. Исследования по истории физики и механики / Отв. ред. Г. М. Идлис. М.: Наука, 2000. 304 с.
17. Кайно Г. Акустические волны. М.: Мир, 1990. 654 с.
18. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.
19. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика. М.: Наука, 1988. 216 с.
20. Логунов А. А. Лекции по теории относительности и гравитации. М.: Изд. МГУ, 1985. 258 с.
21. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 600 с.
22. Магнус К. Гироскоп. М.: Мир, 1974. 526 с.
23. Магнус К. Колебания. М.: Мир, 1982. 304 с.
24. Марч Н., Паринелло М. Коллективные эффекты в твердых телах и жидкостях. М.: Мир, 1986. 320 с.
25. Мах Э. Популярно-научные очерки. СПб.: Образование, 1909. 342 с.
26. Менделеев Д. И. Заветные мысли. М.: Мысль, 1995. 416с.
27. Менделеев Д. И. Сочинения. М.: Изд. АН СССР, 1950. Том XXII.
28. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация. М.: Мир, 1977. Т. 1–3.
29. Ньютона И. Математические начала натуральной философии. М.: Наука, 1989. 690 с.
30. Ольсон Г. Динамические аналогии. М.: ИЛ, 1947. 224 с.
31. Роузвер Н. Т. Перигелий Меркурия. М.: Мир, 1985, 224 с.
32. Смарт У. М. Небесная механика. М.: Мир, 1965. 502 с.
33. Уилл К. Теория и эксперимент в гравитационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1985. 296 с.
34. Assis A. K. T., Clemente R. A. // Nuovo Cimento. 1993. Vol. 108 B. № 6. P. 713–716.
35. Austin L. W., Thwing S. H. // Phys. Review. 1897. Vol. 5. P. 294.
36. Birkhoff G. D. // Proc. Nat. Acad. Sci. 1944. Vol. 30. P. 324–334.
37. Chen Y. T., Cook A. Gravitational Experiments in the Laboratory. Cambridge Univ. Press, 1993. 268 p.

38. Faller J. E. et. al. // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64. P. 825–826.
39. Gerber P. // Ann. Phys. (Lpz.). 1917. Ser. 4. B. 52. S. 415–441.
40. Glaser M. // Metrologia. 1990. Vol. 27. P. 95–98.
41. Hathaway G., Cleveland B., Bao Y. // Physica C. 2003. Vol. 385. P. 488–500.
42. Hayasaka H., Takeuchi S. // Phys. Rev. Lett. 1989. Vol. 63. P. 2701–2704.
43. Iafolla V., Nozzoli S., Fiorenza E. // Phys. Letters A. 2003. Vol. 318. P. 223–233.
44. Majorana Q. // Phil. Mag. 1920. Vol. 39. P. 488–504.
45. Podkletnov E., Nieminen R. // Physica C. 1992. Vol. 203. P. 441.
46. Quinn T. J., Picard A. // Nature. 1990. Vol. 343. P. 732–735.
47. Ritz W. // Ann. Chim. Phys. 1908. Ser. 8. Vol. 13. P. 145–275.
48. Roll P. G., Krotkov R., Dicke R. H. // Ann. Phys. 1964. Vol. 26. P. 442–517.
49. Shaw P. E., Davy N. // Phys. Review. 1923. Ser. 2. Vol. 21. P. 680–691.
50. Shaw P. E. // Phil. Trans. R. Soc. Lond. 1916. Ser. A. Vol. 216. P. 349–392.
51. Thirring W. // Ann. Phys. 1961. Vol. 16. P. 96–117.
52. Weber W. // Werke. Berlin: Springer, 1893. Vol. 3. S. 25–214.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Феноменология в физике	7
2. Физические аналогии	9
3. Экспериментальные основания закона тяготения	11
4. Геометрическая и полевые теории тяготения	16
5. Гравитация и ускорение тел	22
6. Температурная зависимость силы тяжести	31
6.1. Элементарная теория	31
6.2. Эксперимент	33
6.3. Теплофизическая модель	41
6.4. Анизотропия веса кристалла	45
7. Лазерные аналогии в гравитации	49
8. Астрофизические следствия температурной зависимости силы тяжести	53
9. О почти невероятном: полеты наяву	61
Заключение	63
Литература	67

Дмитриев Александр Леонидович
УПРАВЛЯЕМАЯ ГРАВИТАЦИЯ

Издательство «Новый Центр».
127427, Москва, ул. Академика Королева, 21, тел. 219-86-11,
E-mail: ncenter@list.ru.

Подписано в печать 12.08.2005 г. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Усл. печ. листов 4,5. Тираж 1000 экз. Заказ № 2406



Дмитриев Александр Леонидович родился в 1943 г. Окончил физический факультет Ленинградского государственного университета в 1967 г. Много лет работал в различных областях физической оптики и оптоэлектроники — лазерная интерферометрия, голограмма, акустооптика, оптические системы передачи и обработки информации, волоконно-оптические сенсоры и т.д. Доктор технических наук (1991), профессор (1993).

Автор свыше 100 научных трудов и изобретений. Профессор кафедры Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Исследованиями аналогий оптических и гравитационных явлений и экспериментами в области физики гравитации занимается с начала 90-х годов.

Интернет-магазин
OZON.RU



19010077



9 785891 171633
Дмитриев А. Управляющая гравитация