

*Абутин Михаил Викторович,
Колинько Константин Павлович,
Чирцов Александр Сергеевич*

СЕРИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СБОРНИКОВ «ФИЗИКА: МОДЕЛЬ, ЭКСПЕРИМЕНТ, РЕАЛЬНОСТЬ». СТАРШЕКЛАССНИКАМ О ГРАВИТАЦИИ

1. ВВЕДЕНИЕ. НОВАЯ ВЕРСИЯ ПЕРВОГО ТОМА ЭЛЕКТРОННОГО СБОРНИКА



Мультимедийный сборник «Физика: модель, эксперимент, реальность» представляет собой периодически создаваемые электронные тома, каждый из которых посвящен какому-либо разделу современной физики и содержит структурированные разнообразные образовательные и справочные ресурсы по выбранной теме. Концепция построения сборника и его использования была изложена в предшествующей статье [1]. Настоящая статья посвящена более конкретному описанию новой версии первого тома сборника «Гравитация: развитие взглядов от И.Ньютона до А.Эйнштейна», работа над которой была завершена в начале 2004 года.

Как следует из названия, первый том сборника посвящен вопросам, связанным с феноменом гравитации, и содержит обзор фактов, идей и концепций по строению Солнечной системы, небесной механике Ньютона, а также сведения по космологии и общей теории относительности. Работа над первой версией тома сопровождалась уточнением концепции сборника в целом и про-

должалась на протяжении почти трех лет. В ее основу была положена одна из лекций оригинального курса «Школьникам о современной физике», читаемого руководителем проекта для учащихся старших классов школ с углубленным изучением физики и математики. Определенной неожиданностью для авторов оказался тот факт, что основанная на материале, реально читаемом для учащихся школ и легко воспринимаемом аудиторией в режиме живого общения с лектором, первая версия сборника [2] нашла свое применение главным образом при обучении студентов. Что же касается использования в школах, то многими практикующими преподавателями он был признан заведомо сложным и недостаточно полным с точки зрения сведений по элементарной физике.

Элементарные сведения из школьного курса физики не были включены авторами в сборник умышленно, поскольку с точки зрения основной концепции разработчиков компьютер уместно применять в обучении прежде всего в тех случаях, когда традиционные методы не дают желаемого результата. Подходы же к преподаванию школьного курса физики (в рамках обязательной программы) столь тщательно разработаны и оптимизированы и дают столь хорошие результаты (при условии выделения необходимого минимума времени и,

разумеется, наличия заинтересованности в успехе со стороны преподавателей и учащихся), что надежды на существенное улучшение ситуации в результате использования компьютера казались малообоснованными. Именно по этой причине первый вариант сборника был ориентирован на поддержку изучения вопросов и тем, дополняющих и углубляющих программу средних учебных заведений, а основным критерием при отборе учебных ресурсов было требование отсутствия дублирования содержания канонических учебников. В результате большинство включенных в сборник компьютерных моделей посвящены демонстрации систем, аналитическое описание которых невозможно на языке доступной для школьника математики, а видеофрагменты содержат записи реальных экспериментов, трудно воспроизводимых в условиях реальных учебных заведений.

В связи с поступившими в адрес авторского коллектива замечаниями и пожеланиями относительно содержания сборника было принято решение о создании еще одной версии тома, посвященного гравитации, более приближенного к стандартной программе средних школ. С одной стороны, в идеологию создания построенного по модульному принципу сборника изначально была включена возможность его сравнительно легкой адаптации к конкретным запросам конкретных потребителей, которые, как известно, «всегда правы». С другой стороны, наличие гранта Национального фонда подготовки кадров (НФПК) на создание адаптированной к школьной программе версии не могло не заставить авторский коллектив частично пересмотреть свои взгляды на перспективы использования своей продукции в направлении учета мнения авторитетной организации, во многом определяющей политику развития образования в масштабах страны.

В результате объем сборника был увеличен примерно в полтора раза за счет включения его новых ресурсов, близких к школьной программе. Большинство из них были объединены в новые блоки «Равноускоренное движение», «Элементы баллистики», «Законы динамики Ньютона», «Закон со-

хранения механической энергии». Было разработано более 30 соответствующих школьному курсу компьютерных задач, интерактивные тесты по теории в рамках материалов, соответствующих школьной программе и имеющихся в сборнике. Каждый модуль сборника снабжен методическими рекомендациями для преподавателей, в которых обобщен опыт использования авторами электронного пособия как при чтении обязательных курсов для учащихся школ и студентов, так и при проведении факультативных занятий.

Материалы, входившие в первую версию сборника, и новые учебные ресурсы в каждом модуле (теме сборника) сгруппированы по четырем уровням сложности:

– ознакомительный (ориентирован на лиц, желающих ограничиться только качественным описанием темы на уровне «здорового смысла»),

– стандартный (примерно соответствует современному уровню требований по физике, предъявляемых техническими высшими учебными заведениями к своим абитуриентам),

– усиленный (примерно соответствует программам по физике средних учебных заведений с углубленным изучением физики и математики и требованиям вступительных экзаменов ВУЗов физико-математических специализаций),

– факультативный (предназначен для изучения на факультативах, для дополнительного самообразования, может использоваться студентами младших курсов).

Помимо материалов по физике, в сборник был включен краткий электронный справочник по математике, работающий в контекстно-зависимом режиме.

В данной статье приводится краткий обзор содержания сборника и его ресурсов.

2. НЕ ВСЕ ТАК ПРОСТО, КАК КАЖЕТСЯ (краткий обзор ресурсов Раздела 1)

Первый раздел сборника «Не так все просто, как кажется» носит вводный характер и посвящен общей характеристике фун-

даментальных взаимодействий. Среди них гравитационные взаимодействия носят наиболее универсальный характер, поскольку возникают между любыми обладающими массой телами. Фантастическая слабость гравитационных взаимодействий по сравнению с остальными (электромагнитными, сильными и слабыми) приводит к определенным проблемам при их экспериментальном наблюдении. По существу, гравитационные взаимодействия оказываются различимыми на фоне электромагнитных лишь в тех случаях, когда хотя бы одно из участвующих во взаимодействии тел имеет как минимум планетарный масштаб. Поскольку постановка реальных экспериментов с объектами мегамира трудно осуществима на практике, компьютерное моделирование играет весьма важную роль при сопровождении изучения выбранной темы.

На ознакомительном уровне предлагается видефрагмент, посвященный разнообразным проявлениям гравитационных взаимодействий в окружающем мире. Обязательный уровень содержит простейшие компьютерные модели, демонстрирующие наиболее характерные формы движения тел под действием гравитационных сил. Одновременно с информацией по физике пользователю предоставляется минимум сведений, необходимых для дальнейшей работы с электронным интерактивным конструктором, на базе которого строятся физические модели.

Усиленный уровень первого модуля содержит компьютерные демонстрации, иллюстрирующие основные различия между разными типами фундаментальных взаимодействий.

Наконец, на факультативном уровне размещена своеобразная «завязка сюжета электронного тома»: формулировка проблемы устойчивости планетных систем. С помощью компьютерных

моделей показывается (рисунок 1), что стационарные траектории в виде замкнутых эллипсов при движении тела в центральном поле сил притяжения к точечному центру вида

$$\mathbf{F} = -Const \cdot r^n \frac{\mathbf{r}}{r}$$

возникают лишь в случае сил, зависящих от расстояния по одному из двух законов: либо линейному ($n = 1$), либо закону обратных квадратов ($n = -2$). При даже незначительных отклонениях показателя степени n от указанных значений траектории перестают быть замкнутыми, превращаясь в прецессирующие эллипсы, что существенно увеличивает вероятность столкновений и делает систему нестабильной. Указанные факты не могут не вызвать удивления

тому, что в случае гравитационных взаимодействий среди бесчисленного множества мыслимых вариантов зависимости силы от расстояния реализуется именно тот, который обеспечивает устойчивость планетных систем.

3. ЭЛЕМЕНТЫ БАЛЛИСТИКИ (краткий обзор ресурсов Раздела 2)

Второй раздел сборника посвящен рассмотрению наиболее просто наблюдаемого круга явлений, обусловленных грави-

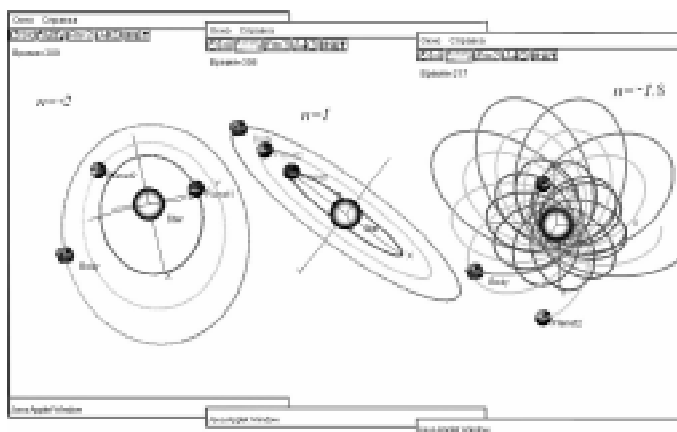


Рисунок 1. «Допустимые» и «нежелательные» варианты для «создания» Солнечной системы.

тацией – движению тел вблизи поверхности Земли. Тематика модуля наиболее близка к изучаемой в рамках школьного курса. Эта особенность темы предопределила включение в модуль большого числа компьютерных задач различного уровня сложности.

Ознакомительный уровень содержит качественное описание движения тел вблизи поверхности Земли и видеофрагмент, демонстрирующий искажающее влияние атмосферы на такое движение. На обязательном уровне предлагаются традиционно вызывающие трудности у учащихся несколько громоздкие формулы для движения тела, брошенного под углом к горизонту, и иллюстрирующие эти формулы компьютерные модели.

Усиленный уровень блока посвящен рассмотрению не всегда хорошо известных учащимся особенностей равноускоренного движения. На примере движения тела, брошенного вертикально вверх, рассматриваются основные закономерности одномерного равноускоренного движения и иллюстрируются классические законы сложения скоростей и ускорений. Компьютерные модели и видеофильм с демонстрацией движения первоначально почти покоившегося и почти свободно падающего тела (рисунки 2) используются для демон-



Рисунок 2. Почти свободное падение почти точечного тела с почти нулевой начальной скоростью.

страции, к сожалению, редко упоминаемого на уроках в школе свойства ускоряющегося из состояния покоя тела проходить за равные интервалы времени отрезки путей, относящихся как последовательные нечетные числа:

$$\Delta S_1 : \Delta S_2 : \Delta S_3 : \dots = 1 : 3 : 5 : \dots$$

На следующем этапе обсуждается возможность разложения движения тела, брошенного под углом к горизонту, на два независимых: равномерное прямолинейное в горизонтальном направлении и равноускоренное – в вертикальном. В качестве иллюстраций такого движения демонстрируются траектории движения волейбольного мяча, анализируется форма струй фонтанов

Петродворца. Среди наиболее интересных компьютерных моделей следует упомянуть иллюстрацию не слишком известных школьникам свойств движения тел, одновременно брошенных из одной точки во всевозможных направлениях с одинаковой начальной скоростью (рисунок 3):

1) в течение всего времени их свободного падения все тела находятся на поверхности одной сферы, радиус которой возрастает линейно со временем;

2) огибающая семейства траекторий этих тел является параболой.

На следующих уровнях изучения темы анализируются причины отступления реально наблюдаемых траекторий движения от параболических: влияние сил трения о воздух, наличие зависимости ускорения свободного падения от высоты подъема тела, обусловленные вращением Земли эффекты. Предлагается видеофрагмент, иллюстрирующий особенности движения вблизи Земли тел конечных размеров.

Для факультативного изучения предлагаются задачи на движение тела в однородном гравитационном поле, ориентированном под углом к поверхности Земли. Несмотря на внешне экзотический вид, эти задачи имеют вполне реальное физическое

содержание, поскольку по сути описывают движение тел, свободно падающих вблизи наклонной плоскости.

4. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА (краткий обзор ресурсов раздела 3)

Третий раздел сборника посвящен обзору астрономических явлений, наблюдаемых в ближнем космосе. Как известно, в



грубом приближении движение тел солнечной системы может быть описано сформулированными Кеплером законами.

Ознакомительный уровень раздела сборника посвящен историческому аспекту проблемы описания закономерностей движения небесных тел, знаменитой дискуссии между сторонниками гео- и гелиоцентрических систем мира. Обзор иллюстрируется видеозаписями экспериментов с маятником Фуко. В следующий вариант школьной версии сборника будут дополнительно включены видеофрагменты, посвященные Галилею и Тихо Браге, а также – русская версия сделанного на базе студии 3d-max [3] анимационного видеофильма, посвященного видимому движению планет в неинерциальной системе отсчета, связанной со вращающейся Землей.

Приводимые в блоке обязательной информации достаточно абстрактные математические формулировки законов Кеплера дублируются визуальной информацией, частично ориентированной на эмоциональные каналы восприятия. Помимо интерак-

тивных Java-моделей, созданных на базе используемой в сборнике программы «Физический конструктор», в материалы блока включены видеозаписи оригинальных компьютерных моделей, разработанных на языках, не допускающих их использования в сетевом режиме [4] и послуживших прототипом традиционных для сборника интерактивных апплетов.

Материалы для углубленного изучения темы содержат задания для самостоятельного изучения в режиме активного поиска примеров движений небесных тел, сопровождающихся отступлениями от законов Кеплера.

Для знакомства на факультативном уровне предлагается далеко не однозначная и дискуссионная проблема существования ряда достаточно простых и изящных закономерностей движения планет Солнечной системы, которые, по-видимому, не могут быть выведены как простые математические следствия из классической (ньютоновской) динамики.

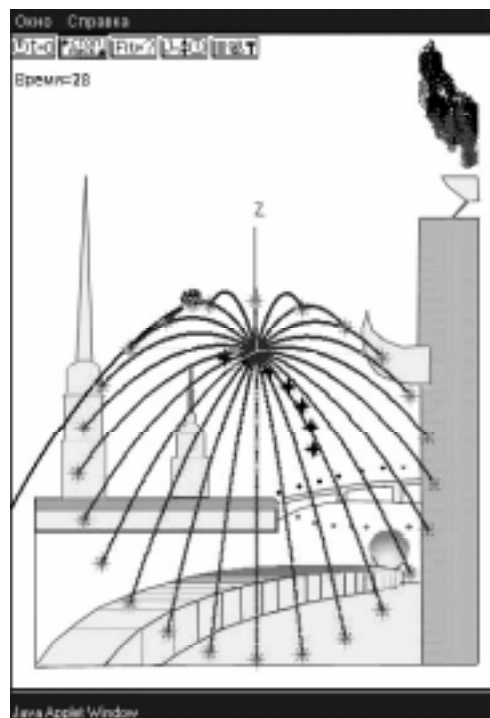


Рисунок 3. Огибающая семейства траекторий тел, выпущенных во всевозможных направлениях из одной точки с одинаковыми начальными скоростями.

5. НЕБЕСНАЯ МЕХАНИКА НЬЮТОНА (краткий обзор ресурсов Раздела 4)

Создание И.Ньютоном основ классической небесной механики явилось одним из первых примеров объединений казавшихся ранее совершенно независимыми друг от друга глобальных физических концепций, в основе которых оказались заложенными одни и те же фундаментальные физические законы. Так, и законы движения точечных тел, брошенных под углом к горизонту, и



внешне совершенно не похожие на них законы Кеплера оказались следствием решения одной и той же системы дифференциальных уравнений, содержащей два общеизвестных закона:

$$\begin{cases} m_n \frac{d^2 \mathbf{r}_n}{dt^2} = \mathbf{F}_n \\ \mathbf{F}_n = \sum_k -G \frac{m_n m_k}{|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_n|^3} (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_n) \end{cases}, \quad (1)$$

где m_n и m_k – массы соответственно рассматриваемого и всех остальных точечных тел, входящих в систему, r_n и r_k – радиус-векторы, задающие их положения. Являясь по сравнению с баллистикой и законами Кеплера более общей и фундаментальной теорией, механика Ньютона оказывается способной описывать множество реально наблюдаемых астрономических и макроскопических явлений, не объясняемых рассмотренными в предшествующих разделах законами.

Как известно, система дифференциальных уравнений (1) имеет аналитическое решение в общем случае только для системы двух точечных или сферически симметричных тел. Для анализа всех прочих ситуаций численное моделирование не имеет альтернативы. На школьном уровне изложения материала из-за отсутствия у учащихся

необходимых для решения задачи (1) знаний высшей математики оказываются бесперспективными попытки построения аналитических решений даже в случае задач двух тел или при описании форм движений в гравитационном поле притягивающего центра. Что же касается астрономических наблюдений, то они по понятным причинам трудно воспроизводимы в условиях учебных заведений и требуют больших затрат времени. Таким образом, оказывается, что для сколько-нибудь подробного изложения материала раздела альтернативы использованию компьютерного моделирования фактически не существует.

Вводная часть раздела посвящена обсуждению значения построенной Ньютоном небесной механики для дальнейшего развития физики и естествознания. На примере законов классической динамики и всемирного тяготения демонстрируются общие тенденции развития теоретической физики: стремление к формулировке возможно более общих законов, применимых в возможно более широком диапазоне условий и вскрывающих единую природу внешне не связанных друг с другом явлений. Именно эту особенность иллюстрирует компьютерная лабораторная работа, в ходе которой учащиеся, увеличивая начальную скорость тела, непосредственно наблюдают изменение характера его движения от падения, описываемого привычными уравнениями баллистики, до вращения по орбите, соответствующего законам Кеплера. Преимущества небесной механики Ньютона по сравнению с законами Кеплера проиллюстрированы с помощью 7 видеозаписей компьютерных моделей [4], демонстрирующих различные виды движений планет и спутников, описываемых в рамках классической механики, но не соответствующих законам Кеплера.

Блок обязательной информации по разделу содержит стандартные формулировки законов динамики Ньютона и закона всемирного тяготения, иллюстрируемые разнообразными компьютерными моделями, касающимися взаимодействий как точечных тел, так и тел конечных размеров. Одним из центральных моментов при изучении этой

темы является обоснование законов Кеплера на основе классической механики. Поскольку необходимый для аналитического решения математический аппарат не доступен для подавляющего большинства школьников, по-видимому, единственным приемлемым на этом уровне способом изложения оказывается использование компьютерного моделирования, то есть по сути численного интегрирования уравнений движения. В результате уже на уровне школьного курса удается показать, что законы Кеплера могут быть строго получены из ньютоновской механики. Аналогичная ситуация возникает в случае гравитационных взаимодействий тел конечных размеров, требующих суммирования сил по большому числу точек. Таким образом демонстрируется зависимость от расстояний гравитационных сил, возникающих между точечным телом и сферически симметричным объектом с распределенной массой (однородным сферическим слоем, шаром и т. д.).

В блок углубленного изучения материала помещены интерактивные компьютерные модели различных систем гравитирующих тел, движение которых не подчиняется законам Кеплера, но может быть рассчитано в рамках классической механики. К ним относятся: движение компонент двойных звезд, взаимное возмущение орбит спутников, движение спутников в системе двойных звезд, движение спутника в поле несферической звезды и т. д. (рисунок 4). В следующей версии сборника планируется поместить набор демонстраций стационарных движений в системах многих тел.

Изложение вопросов, связанных с формулировкой трех основных законов ньютоновской динамики, традиционно вызывает трудности не только у учащихся, но и у многих преподавателей. С одной стороны, сами формулировки законов просты и общеизвестны, с другой – попытки пояснения

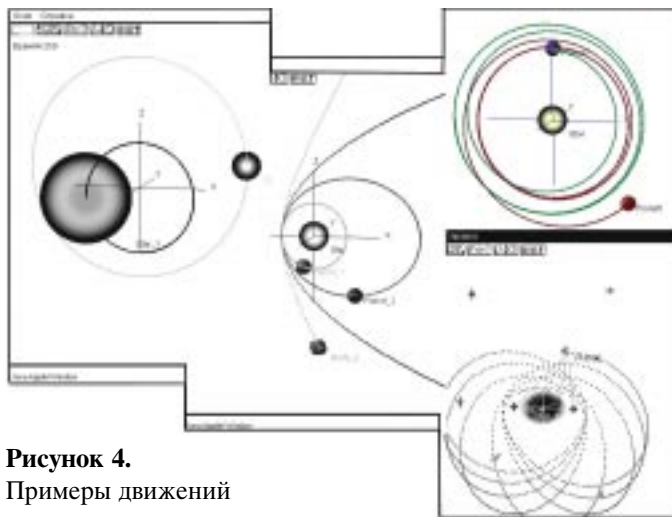


Рисунок 4.
Примеры движений космических тел, не описываемых законами Кеплера.

их «физического смысла» нередко приводят к внутренне противоречивым высказываниям. В связи с этим авторы сочли возможным включить в блок материалов для факультативов свой вариант подробного изложения этой важнейшей части курса механики. Предлагаемый вариант не претендует на исчерпывающую полноту и бесспорность изложения указанных вопросов, но, хочется надеяться, побудит ряд читателей к размышлениям о весьма нетривиальном физическом содержании, лежащем за тремя внешне простыми и постоянно произносимыми формулировками, которые, несомненно, заслуживают большего, чем бездумное повторение привычных фраз учебника. Приведенный текст сопровождается рядом компьютерных моделей, поясняющих смысл таких фундаментальных понятий и положений, как взаимодействие, инерциальность системы отсчета, скалярный характер массы, ее неотрицательность и т. д.



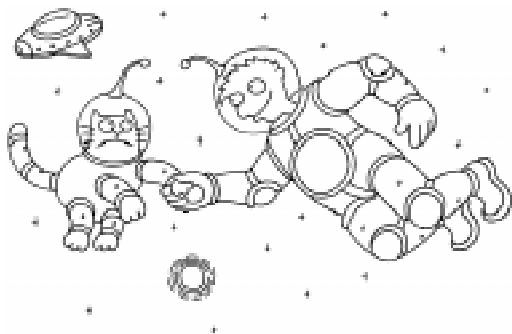
6. КЛАССИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ГРАВИТАЦИИ (краткий обзор ресурсов Раздела 5)

Традиции современной физики не позволяют останавливаться на описании явлений природы и ориентируют на исследования внутренних механизмов, обуславливающих эти явления.

Пятый раздел содержит краткий обзор дальнейшего развития методов описания гравитационных взаимодействий в рамках концепции поля. В зависимости от возрастающего уровня сложности блоки посвящены соответственно:

- 1) концепции близкодействия,
- 2) введению понятия гравитационного поля,
- 3) сопоставлению свойств электростатических и гравитационных полей и демонстрации различий между понятиями гравитационной и инертной массы,
- 4) краткому обзору неудачных гидродинамических моделей гравитации.

7. НЕВЕСОМОСТЬ (краткий обзор ресурсов Раздела 6)



Явление невесомости специфично для гравитационных взаимодействий и является весьма существенным с точки зрения современной концепции гравитации. Ознакомительный блок раздела посвящен качественному описанию явления невесомости и проиллюстрирован несколькими видеофрагментами, демонстрирующими явление невесомости в различных условиях.

Обязательный блок посвящен стандартно изучаемому в рамках средней школы явлению невесомости, возникающему при свободном падении системы в однородном гравитационном поле. Соответствующие компьютерные демонстрации дублируются видеозаписями экспериментов со свободно падающим маятником и маятником Любимова, установленным на платформе, соскальзывающей по наклонной плоскости в условиях практического отсутствия сил трения.

Материалы повышенной сложности посвящены эффекту возникновения невесомости при движении в гравитационных полях произвольной конфигурации. Блок содержит большой набор компьютерных демонстраций на эту тему (рисунок 5) и заданий для самостоятельных исследований с помощью интерактивных моделей.

Последний блок материалов посвящен обзору причин, приводящих к слабым нарушениям состояния полной невесомости, к которым следует отнести гравитационные взаимодействия между составляющими свободно падающую систему объектами, наличие внешних негравитационных полей и пространственные изменения гравитационного поля на характерных для рассматриваемой системы масштабах. Перечисленные нарушения являются прекрасным материалом для компьютерного моделирования, поскольку реальные демонстрации указанных эффектов по понятным причинам трудно осуществимы. Исключение составляет, по видимому, лишь одно сравнительно легко наблюдаемое в земных условиях явление – океанские приливы, которые обусловлены различием в расстояниях от поверхности

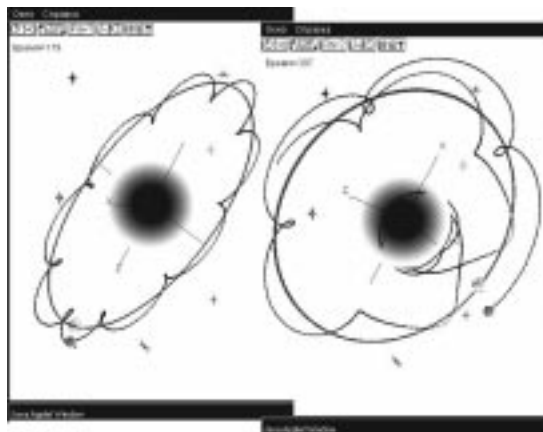
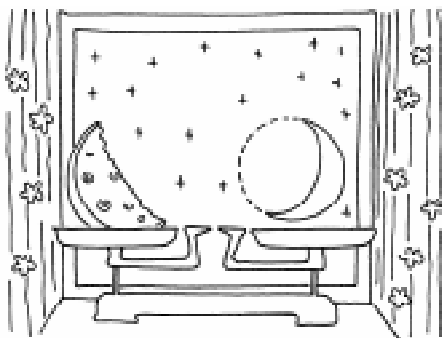


Рисунок 5. Локальный характер явления невесомости: спутник планеты, вращающейся вокруг массивной звезды, движется так же, как и в случае неподвижной планеты, в отсутствие гравитационного поля звезды. При увеличении радиуса орбиты спутника неоднородность гравитационного поля звезды становится существенной и приводит к искажению его траектории вплоть до качественного изменения характера движения.

воды и центра Земли до космических тел, создающих заметные гравитационные поля. Соответствующий видеотрегмент и компьютерная демонстрация находятся в стадии разработки.

8. ПРИНЦИП ЭКВИВАЛЕНТНОСТИ (краткий обзор ресурсов Раздела 7)



Удивительное свойство пропорциональности гравитационной массы (гравитационного заряда) массе инертной, приводящее к возникновению невесомости, по существу означает принципиальную неразличимость для находящегося в замкнутой локальной системе отсчета наблюдателя двух состояний: равномерного прямолинейного движения системы в отсутствие внешних сил и свободного падения в гравитационном поле. Точно так же находящийся в небольшой замкнутой кабине космического корабля наблюдатель, ощущая свой вес, не сможет, не выглянув наружу, установить истинной причины своего ощущения: вызвано ли оно силой тяжести или возникло из-за ускоренного движения космического аппарата. Сформулированные утверждения составляют суть принципа эквивалентности, лежащего в основе общей теории относительности.

Ознакомительный блок раздела прослеживает логику поэтапного развития и обобщения принципа относительности от сформулированного Галилеем первого механистического утверждения до провозглашенного Эйнштейном принципа эквивалентности. Строгие формулировки всех перечисленных принципов помещены в блок обязательных для изучения материалов.

Для желающих изучить тему на углубленном уровне предлагается блок информации о методах описания явлений природы в неинерциальных системах отсчета, где помимо «реальных» сил, обусловленных взаимодействиями между телами, вводятся псевдосилы инерции, весьма схожие с гравитационными силами. Кроме ряда демонстраций действия таких сил, пользователю предлагается ряд задач повышенной сложности, которые могут быть «изящно» решены в результате перехода в такую неинерциальную систему отсчета, где «вымышленные» силы инерции компенсируют большую часть «реальных» взаимодействий.

Последний по уровню сложности блок посвящен силам инерции, возникающим во вращающихся системах отсчета. Именно действием таких сил наблюдатель, находящийся во вращающейся системе отсчета (например, на планете Земля), объяснит эффект поворота плоскости колебаний маятника Фуко, остающейся неподвижной с точки зрения находящегося в инерциальной системе отсчета наблюдателя. Возможность обеих трактовок одного и того же явления удобно проиллюстрировать с помощью видеотрегмента, в котором движение модели маятника Фуко одновременно фиксируется двумя видеокамерами: расположенной в «неподвижной» аудитории и вращающейся вместе с играющей роль неинерциальной системы отсчета скамьей Жуковского.

Идея построения компьютерной модели поведения маятника Фуко основана на формальном сходстве между выражениями для кориолисовой силы инерции и силой Лоренца, действующей на электрический заряд, движущийся в магнитном поле:

$$\mathbf{F}_K = -m[\boldsymbol{\omega}, \mathbf{v}'],$$

$$\mathbf{F}_L = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}].$$

Таким образом, для моделирования движения тела во вращающейся системе отсчета (рисунок 6) достаточно добавить сходную с гравитационной центробежную силу, сообщить телу добавочный эффективный электрический заряд и добавить постоянное магнитное поле, ориентированное вдоль оси вращения.

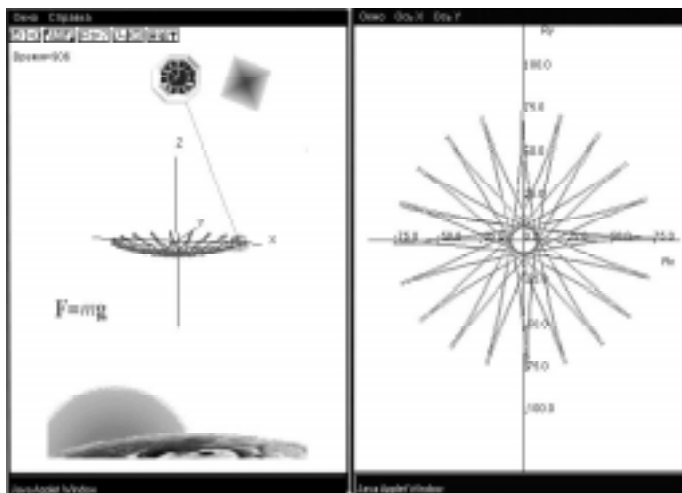
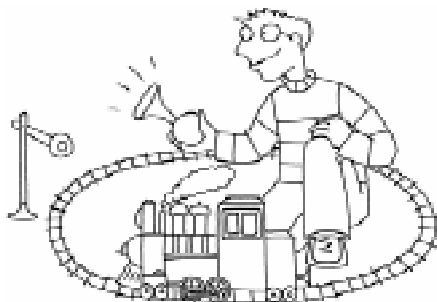


Рисунок 6. Компьютерная модель поведения маятника Фуко, испытывающего действие сил инерции.

9. ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА (краткий обзор ресурсов Раздела 8)

Данный раздел представляет собой небольшое отступление от основной темы сборника, содержащее информационные ресурсы, необходимые для последующего восприятия космологических концепций, тесно связанных с общей теорией относительности.

Качественное описание эффекта на ознакомительном уровне дополняется простейшей его теорией для механических и акустических волн, изучаемых в средней школе. В соответствующем блоке содержатся видеозаписи оригинальных (и достаточно простых) демонстрационных экспериментов. Так, например, в акустике эффект Доплера регистрируется по изменению частоты гудка проходящего мимо локомотива. Для получения количественных результатов использовалась компьютерная обработ-



ка звукового сигнала, в результате которой получался Фурье-спектр шума от проходящего мимо поезда (рисунок 7). На фоне «почти белого» шума достаточно четко выделен пик, соответствующий самому гудку, характерная частота которого различалась примерно на 100 Гц в случаях приближения и удаления источника.

Достаточно сложная экспериментальная демонстрация и качественное объяснение механизма возникновения эффекта Доплера в оптике содержится в блоке углубленного изучения материала. Обусловленный тепловым движением излучающих свет атомов в условиях разряда эффект весьма слаб и для уверенной регистрации требует использования спектрального прибора с большой разрешающей силой. В составившем основу видефрагмента эксперименте в качестве такого прибора использован интерферометр Фабри-Перо. С его помощью удастся продемонстрировать заметное расширение спектральных линий излучения атомов ртути, возникающее в результате постепенного разогрева газа в разряде.

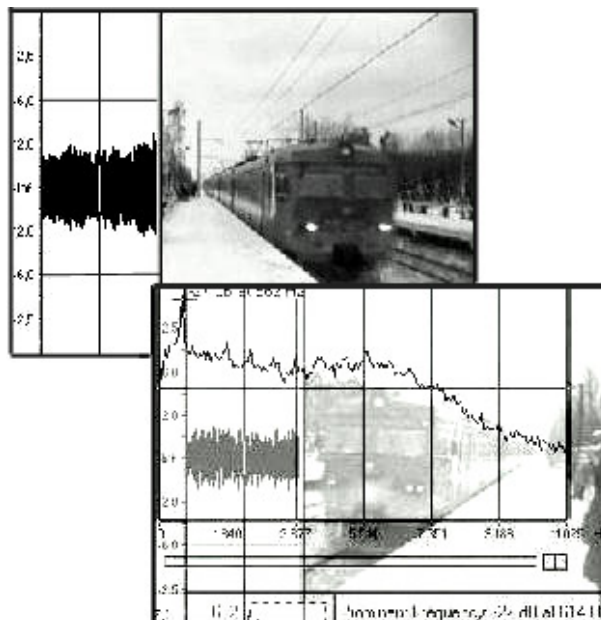
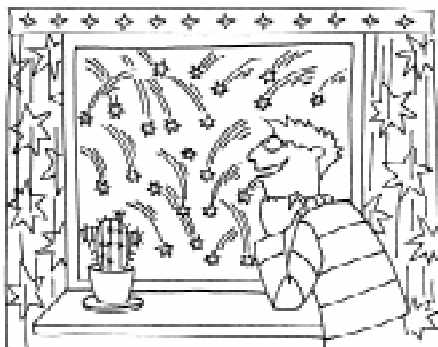


Рисунок 7. Демонстрация эффекта Доплера в акустике, использующая компьютерную обработку звукового сигнала.

На уровне факультатива может быть рассмотрено количественное описание оптического эффекта Доплера, требующее учета релятивистских законов сложения скоростей.

10. РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ (краткий обзор ресурсов Раздела 9)

Очередной раздел сборника посвящен вопросам космологии. На первом (качественном) уровне обсуждается проблема безграничности и бесконечности Вселенной, а также дается минимальная информация о наблюдаемом красном смещении звезд и галактик.



Обязательный уровень содержит разбор известной олимпиадной задачи о соответствии предложенного Хабблом закона расширения Вселенной нашим представлениям о ее однородности. Пользователю предлагаются компьютерные иллюстрации к наиболее известным моделям расширяющейся Вселенной (открытой и закрытой).

Составляющий основу третьего блока видефрагмент демонстрирует двумерную модель расширяющейся искривленной Вселенной, для которой выполняется закон Хаббла.

В качестве наиболее естественного объяснения наблюдаемого эффекта красного смещения галактик принято приводить гипотезу о расширении Вселенной, в результате которого спектры излучения удаляющихся от нас звезд оказываются смещенными в длинноволновую область. Зависимость величины крас-

ного смещения от расстояния до источника свидетельствуют о том, что скорость относительного удаления галактик пропорциональна расстоянию между ними (закон Хаббла). На базе «Физического конструктора» построены 3d-демонстрации основных моделей (рисунок 8) глобального расширения Вселенной:

- 1) без учета торможения гравитационными силами,
- 2) учитывающая гравитационные взаимодействия «открытая модель» (допускает бесконечно долгое расширение),
- 3) «закрытая модель» (предсказывает замену расширения сжатием, вызванным действием гравитации).

Раздел завершается блоком, посвященным так называемому «парадоксу ночного неба», или «фотометрическому парадоксу», и обсуждению вариантов разрешения парадокса в рамках различных космологических концепций.

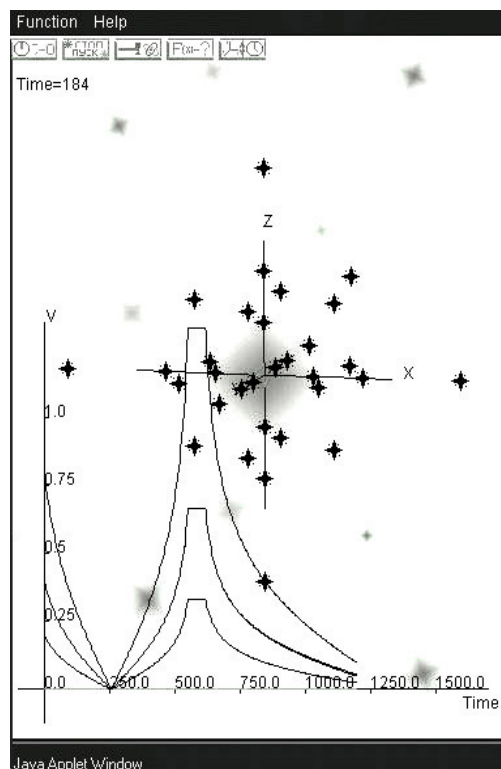


Рисунок 8. Компьютерное моделирование расширяющейся Вселенной. Модель закрытой Вселенной.

11. ИСКРИВЛЕННОЕ ПРОСТРАНСТВО-ВРЕМЯ И ГРАВИТАЦИЯ (краткий обзор ресурсов Раздела 10)

Предпоследний раздел сборника посвящен описанию основных физических идей, положенных в основу общей теории относительности. На ознакомительном уровне предлагается видеозапись демонстрационного эксперимента, в котором малозаметное искривление двумерной поверхности приводит к возникновению особенностей движения находящихся на ней тел, весьма напоминающих результат действия сил тяготения. Эти идеи развиваются на следующем уровне сложности, где и дается качественное описание современных представлений о связи гравитации с геометрическими свойствами пространства-времени. В качестве иллюстраций, ориентированных скорее на эмоционально-чувственные, а не логические каналы восприятия, предлагаются видеозаписи достаточно простых экспериментов с движением тел по искривленной поверхности. К указанным экспериментам следует относиться лишь как к достаточно остроумным аналогиям, не претендующим на сколько-нибудь строгое отражение идей общей теории относительности.

Блок повышенной сложности содержит обсуждение известного мысленного эксперимента, обосновывающего неизбежность изменений геометрических свойств пространства при переходе во вращающуюся (неинерциальную) систему отсчета. Соответствующий иллюстративный материал находится в стадии разработки. Для разбора на факультативе предоставляется возможность кратко познакомиться с математическим аппаратом, используемым общей теорией относительности.

Среди ресурсов раздела содержится компьютерная модель, иллюстрирующая возникновение классической параболической

трехмерной траектории тела, брошенного вблизи поверхности Земли, в результате проектирования слабо искривленной четырехмерной траектории на координатное подпространство. Приводятся видеозаписи нескольких экспериментов, в которых незаметное для наблюдателя искажение геометрии системы приводит к эффектам, весьма напоминающим проявления гравитационных взаимодействий.

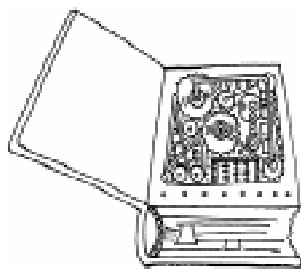
12. ДВИЖЕНИЕ ТЕЛ В ИСКРИВЛЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ-ВРЕМЕНИ (краткий обзор ресурсов Раздела 11)

Заключительный раздел сборника подводит итог истории развития взглядов человечества на проблему гравитации и тесно связанных с ней представлений о глобальном строении космического пространства. В частности, обсуждается современная (несколько неожиданная) точка зрения на вызывавшую весьма жаркие дискуссии альтернативу между геоцентрической и гелиоцентрической системами мира. Обсуждаются методы экспериментальной проверки современной теории, среди которых немаловажное место занимают наблюдения искривления хода световых лучей вблизи массивных тел. В этой связи в раздел включены видеозаписи затмений Солнца, в ходе которых удастся зарегистрировать указанный эффект.



В основные учебные блоки последнего раздела включены те посвященные феномену гравитации материалы, которые не вошли в предшествующие разделы в связи с логикой их изложения. Среди последних имеется некоторое количество ресурсов, внешне носящих не совсем серьезный характер, использование которых также может оказаться полезным для преподавателей и учащихся. В их числе – компьютерный вариант весьма нетривиальной физической задачи, созданный по сюжету хорошо известной истории, произошедшей с Винни-Пухом и Пятачком (рисунок 9). Неизменным успехом практически в любой аудитории пользуется демонстрация опыта с маятником Капицы, заставляющего неуклюжего наблюдателя усомниться в невозможности явления антигравитации. Последующая демонстрация компьютерной модели показывает, что законы классической физики допускают возможность существования устойчивого положения системы вблизи точки, в которой без принятия некоторых дополнительных мер равновесие будет заведомо неустойчивым (рисунок 10).

Раздел завершается заключительным видеофрагментом, снятым у могилы великого Галилео Галилея, одним из первых остро поставивших вопрос о преимуществах гелиоцентрической системы мира по сравнению с геоцентрической, вопрос, который после создания Альбертом Эйнштейном общей теории относительности в значительной степени утратил свою актуальность.



13. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СБОРНИКА

Рассмотренная версия первого тома сборника размещается на двух компакт-дисках и содержит более 150 компьютерных демонстраций, более 30 видеофрагментов общей продолжительностью порядка 45 минут, примерно 30 минут аудиозаписей фрагментов реальных лекций. Сокращенная версия поставляется на одном

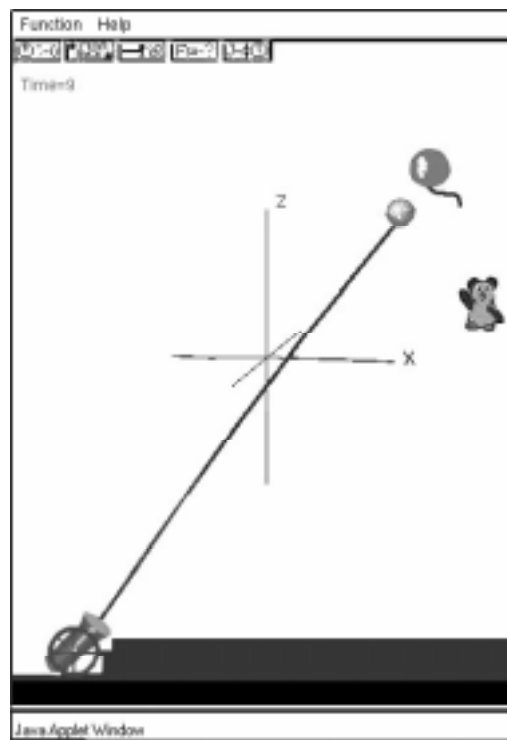


Рисунок 9. Непростая задача о печальном случае из жизни Винни-Пуха.

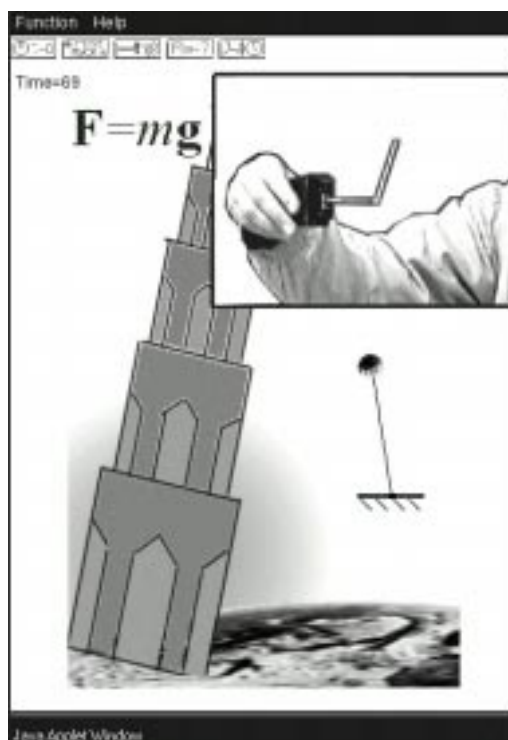


Рисунок 10. Демонстрация «антигравитации» с помощью маятника Капицы.

диске и не содержит аудиозаписей реальных фрагментов лекций, интерактивных тестов и методических указаний для преподавателей. Демонстрационная версия размещена на сайте www.spin.nw.ru. В ходе подготовки данной статьи у авторов появились новые идеи относительно создания дополнительных оригинальных мультимедийных ресурсов по темам сборника. В связи с этим становится весьма вероятной деятельность

по подготовке третьей, существенно расширенной версии первого тома. Авторы с благодарностью отнесутся к любому конструктивному мнению по поводу содержания сборника и готовы рассмотреть вопрос как о включении в новую версию дополнительных образовательных ресурсов, так и о создании специализированных версий в соответствии с конкретными интересами потребителей.

Литература

1. *Абутин М.В., Колинько К.П., Чирцов А.С.* Концепция и опыт использования в реальном учебном процессе электронных мультимедийных сборников по физике // Компьютерные инструменты в образовании, 2004, № 5.
2. *Абутин М.В., Григорьев И.М., Колинько К.П., Никольский Д.Ю., Чирцов А.С.* Физика: модель, эксперимент, реальность, в 8 т. Т. 1. Гравитация: развитие взглядов от И. Ньютона до А. Эйнштейна // СПб.: Из-во С.-Петербур. Ун-та, 2001.
3. *Маров М.* Энциклопедия 3ds max 4 // СПб.: Изд. дом «Питер», 2003.
4. *Бутиков Е.И.* Движение планет и спутников. Законы Кеплера // сер. «Компьютерные модели в физике». СПб.: Из-во ЦПО «Информатизация образования», 1995.

*Абутин Михаил Викторович,
инженер-программист физического
факультета СПбГУ,*

*Колинько Константин Павлович,
аспирант физического факультета
СПбГУ,*

*Чирцов Александр Сергеевич,
доктор физ.-мат. наук, декан
физического факультета СПбГУ.*



Наши авторы, 2004.
Our authors, 2004.