

Научная статья
УДК 372.853
DOI: 10.47438/2309-7078_2024_2_73

ПРОФИЛЬ АВТОГРАВИТИРУЮЩЕЙ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ РАЗРАБОТКИ ДИДАКТИЧЕСКОГО АТТРАКТОРА «ПЛУТОНИЯ»

Юрий Александрович Померанцев¹, Елена Игоревна Свиридова²

Воронежский государственный педагогический университет^{1, 2}
Воронеж, Россия

¹Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики,
ORCID ID: 0009-0007-3827-9691, тел.: (473) 255-47-22, e-mail: pomerant_yu@mail.ru

²Кандидат педагогических наук, доцент кафедры информатики, информационных технологий и цифрового образования, ORCID ID: 0009-0006-8549-2332, тел.: (473) 255-07-45, e-mail: sei_19@mail.ru

Аннотация: В рамках методической разработки дидактического аттрактора «Плутония», базирующегося на идее одноименного фантастического романа академика Обручева о путешествии внутрь полой Земли, исследуются свойства, которыми, в силу физических законов, должна обладать внутренняя атмосфера, испытывающая воздействие лишь собственного гравитационного поля. Показано, что эти свойства нетривиальны, порой даже неожиданны. На основе полученных точных результатов построена краткая метаподсказка для обучающихся, позволяющая доступными им средствами ставить и разрешать разнообразные физические вопросы об атмосфере Плутонии.

Ключевые слова: дидактический аттрактор, учебно-исследовательская деятельность, аэрономия, атмосфера, тяготение, Плутония, метаподсказка

Для цитирования: Померанцев Ю.А., Свиридова Е.И. Профиль автогравитирующей атмосферы идеального газа для методической разработки дидактического аттрактора «Плутония» // Известия Воронежского государственного педагогического университета. 2024. № 2. С. 73–79. DOI: 10.47438/2309-7078_2024_2_73

Введение

В последнее время активно развивается возникающая на стыке идейных полей синергетики и педагогики концепция дидактического аттрактора как базовой дидактической единицы перспективных образовательных систем [7]. В отличие от подвергаемых справедливой критике [2] прямолинейных попыток механического заимствования понятия «аттрактор» в том виде, в котором оно используется в нелинейной динамике, дидактический аттрактор понимается как подлежащая преимущественно самостоятельному и активному освоению обучающимися проблемная область, обладающая тремя атрибутами: субъективной привлекательностью [13], объективной притягательностью и внутренней интегрированностью. Конкретные примеры существующих и потенциальных дидактических аттракторов можно найти в работах С.С. Муравьева-Смирнова и др. из МИФИ [3] и В.В. Свиридова и соавторов из ВГПУ [7; 8].

На физико-математическом факультете Воронежского государственного педагогического университета выполняется методическая разработка дидактического аттрактора «Плутония» (далее – ДАП) [6; 9; 10]. Субстратом разработки и основным средством обеспечения ее субъективной привлекательности послужил одноименный научно-фантастический роман выдающегося российского геолога и путешественника, академика В.А. Обручева [5]. По сюжету романа, научная экспедиция попадает внутрь Земли, которая (и в этом главное фантастическое допущение) оказывается полой. Внутреннюю область полой Земли Обручев именует Плутонией; для краткости (и по контрасту) ее наружную область мы, следуя предыдущей работе [9], будем называть «Олимпийей». Основное содержание учебно-исследовательской работы обучающихся в ДАП заключается в выяснении того, в какой степени описываемые Обручевым приключения экспедиции в столь необычной ситуации согласуются с законами физики, и как «на самом

деле» должны были бы происходить те или иные физические явления внутри и снаружи полой планеты.

Поскольку ДАП предназначен прежде всего для активизации познавательной деятельности *школьников*, то основные методические сложности, с которыми приходится сталкиваться разработчикам, связаны не столько с поиском проблемных ситуаций (аттрактор чрезвычайно богат содержательно и буквально набит разнообразными физическими вопросами, возникающими едва ли не к каждой странице романа), сколько с необходимостью такой постановки учебно-исследовательских задач и таких подходов к их решению, которые не требуют, совсем или почти, выхода за рамки школьной программы по физике и математике. В большинстве случаев это удается, хотя и требует некоторой методической изобретательности. Например, для анализа сил тяготения в Плутонии («действительно ли там все ходят вверх ногами»?) требуется умение представить гравитационное поле тела, не являющегося ни материальной точкой, ни однородным шаром – а закон всемирного тяготения в той форме, в которой он изучается в 9 классе, справедлив лишь для этих двух случаев. Выход в том [9], чтобы использовать математическую идентичность законов Кулона и всемирного тяготения и на этой базе сформулировать правило превращения формул электростатики в формулы теории тяготения. А уж в электростатике, даже школьной, рассматриваются поля, создаваемые объектами со сложной геометрией.

Однако, несмотря на все усилия разработчиков ДАП, в нем остаются проблемные ситуации, важные для понимания физики Плутонии, которые не удается полностью адаптировать к уровню целевой аудитории. Это, по-видимому, неизбежное следствие (второй атрибут!) самой природы дидактического аттрактора, обязанного обладать обширными связями с самыми разными предметными областями, в том числе и такими, свободная ориентация в которых требует владения понятийным и техническим аппаратом более высокого уровня.

В подобных случаях приходится прибегать к своего рода *deus ex machina*, то есть предоставлять обучающимся готовый вспомогательный результат – назовем его *метаподсказкой*, – к которому они пока не способны прийти самостоятельно. Основные методические требования к метаподсказке заключаются в ясном и конкретном характере, четко очерченной области ее применимости и инструментальной мощи, то есть возможности порождать широкий спектр верных выводов без прямого обращения к методам, которыми обосновывается сама метаподсказка. Аналогичным образом, продуктивное использование, скажем, лазерного дальномера не требует непременно знания физических принципов работы лазера и интерферометра.

Простым примером метаподсказки могут служить две теоремы, доказанные еще Ньютоном ([4], глава «О притягательных силах сферических тел»). В современной формулировке они звучат следующим образом.

Первая теорема Ньютона. Однородный сферический слой вне себя притягивает другие тела так, как если бы вся его масса была сосредоточена в его центре.

Вторая теорема Ньютона. Во всех точках внутри однородного сферического слоя создаваемая им сила тяготения равна нулю.

Доказательство теорем Ньютона (особенно первой) требует знакомства с интегральным исчислением и владения техникой вычисления кратных интегралов. Однако если просто принять их как истинные утверждения, то уже гораздо более простыми, доступными школьнику средствами становится возможно:

- объяснить, почему сила притяжения Землей человека на ее поверхности, вычисляется с помощью школьной формулы для закона всемирного тяготения, хотя Землю в данном случае нельзя считать ни материальной точкой, ни *однородным шаром*;

- выяснить, как меняется ускорение свободного падения по мере продвижения от поверхности Земли к ее центру [11];

- описать, не только качественно, но и полуколичественно [9], гравитационное поле гипотетической полой планеты, в которой, согласно роману [5], есть довольно большое отверстие.

В настоящей работе представлены результаты разработки более сложной метаподсказки для комплекса вопросов, возникающих в ходе учебно-исследовательской работы школьников в ДАП при физическом анализе свойств атмосферы, заполняющей внутреннюю полость Земли. Эти свойства довольно необычны. Что еще существеннее, задача о такой атмосфере оказывается принципиально новой, до сих пор не ставившейся даже профессиональными аэрономами.

Обычно в аэрономии атмосферу рассматривают как относительно тонкую газовую оболочку, находящуюся во *внешнем* гравитационном поле, которое создается конденсированным телом планеты. В такой картине сама атмосфера на тяготение планеты не влияет ввиду своей малой массы: для реальной Земли – порядка 10^6 от массы планеты [12], и даже для Венеры – всего 10^4 . Дальнейшее уточнение происходит путем учета разнообразных дополнительных факторов (динамика самой планеты, электромагнитное и корпускулярное излучение ее материнской звезды и т.п.), взятых в их взаимодействии и эволюции [14].

В ДАП ситуация отличается принципиально. Во-первых, твердая оболочка гипотетической полой Земли *окружает* атмосферу Плутонии и потому никакого тяготения в пределах последней не создает (вторая теорема Ньютона!). Атмосфера Плутонии – *автогравитирующая*, то есть испытывает только свое собственное тяготение¹. Во-вторых, она гораздо протяженнее привычной нам атмосферы Олимпии: ее толщина измеряется тысячами километров. Кроме того, плотность воздуха в Плутонии должна быть больше, чем в Олимпии. Отсюда следует, что масса атмосферы Плутонии может быть весьма значительна и составлять заметную долю массы Земли в

¹ Существованием Плутона, описанного Обручевым внутренним светилом Земли, мы здесь пренебрегаем, как ввиду

его малой массы и размеров, так и по иным соображениям, веским, но выходящим за рамки данной работы.

целом. Впечатляющей должна быть и разница плотностей воздуха между центром и поверхностью Плутона. В Олимпии плотность атмосферы падает вдвое при подъеме на каждые 6 км [12]; в Плутонии, с учетом массивности ее атмосферы, градиент плотности воздуха может быть лишь немногим меньше – но действует он там на протяжении тысяч километров.

Для вычисления профиля плотности $\rho(r)$, где r – расстояние от центра Земли, необходимо знать, как от r зависит тяготение (ускорение свободного падения) g . Но ход $g(r)$, в свою очередь, определяется распределением массы по атмосфере Плутона, то есть профилем плотности $\rho(r)$. Взаимозависимость тяготения и плотности оказывается нелинейной и не поддается выяснению из простых качественных соображений. Для формирования метаподсказки, доступной и полезной для понимания школьниками данной физической ситуации, необходимо вычислить эту взаимозависимость с использованием арсенала университетской физики и математики и снабдить результаты методическими указаниями для учителя о путях ее использования в ДАП.

Постановка задачи о профиле атмосферы Плутона

Рассматривается атмосфера идеального газа, находящаяся в гидростатическом равновесии в собственном гравитационном поле. Атмосфера окружена сферической оболочкой с внешним радиусом $R_{\oplus} = 6400$ км, толщиной $h = 200$ км (так вытекает из текста романа) и массой порядка массы реальной Земли (чтобы тяготение в Олимпии имело привычное значение $g_0 = 10$ м/с²). По описанию Обручева, атмосферы Плутона и Олимпии сообщаются через отверстие в земной оболочке. Для упрощения будем считать отверстие узким (диаметр $\ll h$), так что оно не возмущает гравитационное поле в Олимпии, Плутонии и разделяющей их оболочке.

Химический состав атмосферы Плутона примем таким же, как в Олимпии (молярная масса $\mu = 0,029$ кг/моль). Температуру по всему объему Плутона будем считать равной $T = 1300$ К. Столь высокое значение обусловлено ограниченной возможностью отвода теплоты, выделяющейся при распаде радионуклидов в земной оболочке, из замкнутого пространства Плутона. Оценки, выполняемые в ходе учебно-исследовательской работы в ДАП, показывают, что перепад температур в 1000 К между Плутонией и Олимпией является минимальным, при котором становится сколько-нибудь эффективным кондуктивное охлаждение (за счет теплопроводности сквозь оболочку) и включается конвективное охлаждение через отверстие в оболочке.

Уравнение гидростатического равновесия идеального газа в гравитационном поле [12], с учетом сферической симметрии задачи и уравнения Менделеева–Клапейрона, принимает вид:

$$\rho' = -\frac{2m\rho}{\chi r^2} \quad ; \quad m' = 4\pi r^2 \rho \quad , \quad (5)$$

где штрихи означают дифференцирование по r , а

$$\chi = 2RT / \mu G \quad (6)$$

– термический градиент массы. Для принятых значений μ и T он составляет $1,1 \cdot 10^{16}$ кг/м.

$$\frac{d\rho(r)}{dr} = -\frac{\mu g(r)}{RT} \rho(r) \quad , \quad (1)$$

где $R = 8,31$ Дж/кг моль – универсальная газовая постоянная. Согласно первой теореме Ньютона, тяготение g меняется с удалением от центра Земли как

$$g(r) = G \frac{m(r)}{r^2} \quad , \quad (2)$$

где гравитационная постоянная $G = 6,67 \cdot 10^{11}$ м³/кг с², $m(r)$ – масса воздуха внутри сферы радиуса r . Уравнение для $m(r)$, замыкающее систему (1), (2), вытекает из того, что масса dm воздуха в сферическом слое толщиной dr равна произведению объема слоя на плотность $\rho(r)$:

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad . \quad (3)$$

Осталось поставить граничные условия. В центре Плутона (при $r = 0$) они очевидны: $g(0) = 0$, $m(0) = 0$, а $\rho(r)$, будучи, согласно (1), монотонно убывающей функцией, в нуле принимает некоторое максимальное значение ρ_0 , так что $d\rho/dr$ там тоже обращается в нуль.

С условиями на поверхности Плутона сложнее. Реальное физическое требование относится к поверхности Олимпии и состоит в том, чтобы при нормальной температуре $T_{\text{норм}} = 300$ К там было нормальное давление $p_{\text{норм}} = 1$ атм 10^5 Па и плотность $\rho_{\text{норм}} = \rho_{\text{норм}} \mu / RT_{\text{норм}} = 1,2$ кг/м³. Для получения условий в Плутонии надо учесть, что, благодаря отверстию в оболочке, атмосферы Олимпии и Плутона также находятся в гидростатическом равновесии. Тогда с помощью уравнения (1) по условиям на верхнем срезе отверстия (в Олимпии) можно определить условия на его нижнем срезе (на поверхности Плутона). Эта задача не элементарна, поскольку с погружением в отверстие меняются и тяготение, и температура, но, как показывает наш опыт, вполне поддается численному решению школьниками, освоившими электронные таблицы. Таким образом, возможно поставить граничное условие на поверхности Плутона в виде

$$\rho(r_{\text{уп}}) = \rho_{\text{уп}} \quad , \quad (4)$$

где $r_{\text{уп}} = R_{\oplus} - h \approx 6200$ км – радиус Плутона.

Упомянутое выше численное решение приводит к оценке плотности воздуха у поверхности Плутона $\rho_{\text{уп}} \approx 130$ кг/м³.

Решение задачи о профиле атмосферы Плутона

Для начала исключим из уравнений тяготение g , подставив (2) в (1). Остается система двух дифференциальных уравнений для неизвестных функций $\rho(r)$ и $m(r)$:

Проанализируем поведение физического решения вблизи центра Плутона. Как обсуждалось выше, там плотность максимальна и принимает некоторое ненулевое значение ρ_0 . Тогда в достаточно малой окрестности центра $\rho(r) \approx \rho_0$, откуда $m(r) \approx (4/3)r^3\rho_0$. Подстановка этих результатов в первое из уравнений (5) позволяет уточнить зависимость $\rho(r)$, что, в свою очередь, позволяет уточнить $m(r)$ с помощью второго уравнения:

$$r \ll r_0 : \rho(r) \approx \rho_0 \left(1 - \frac{1}{6} \frac{r^2}{r_0^2} \right); \quad m(r) \approx \frac{4\pi}{3} \rho_0 r^3 \left(1 - \frac{1}{10} \frac{r^2}{r_0^2} \right), \quad (7)$$

где

$$r_0 = \sqrt{\frac{\chi}{8\pi\rho_0}} = \sqrt{\frac{RT}{4\pi\mu G\rho_0}} \quad (8)$$

имеет смысл радиуса центральной области (ядра), в пределах которой атмосферу Плутона можно считать практически однородной.

Для противоположного случая больших r заметим, что (5) имеет, среди прочих, решение

$$\rho_a(r) = \chi/4\pi r^2; \quad m_a(r) = \chi r, \quad (9)$$

что проверяется непосредственной подстановкой. Оно не является физическим, поскольку дает бесконечную плотность в нуле, однако служит асимптотикой физического решения при $r \rightarrow \infty$. Чтобы доказать это, введем новые переменные y , x и τ :

$$y = \frac{\rho}{\rho_a} = \frac{4\pi r^2}{\chi} \rho; \quad x = \frac{m}{m_a} = \frac{m}{\chi r}; \quad \tau = \ln\left(\frac{r}{r_0}\right). \quad (10)$$

Подстановка (10) в (5) дает для модуляторов y и x систему автономных уравнений,

$$\frac{dy}{d\tau} = 2y(1-x); \quad \frac{dx}{d\tau} = y-x, \quad (11)$$

которая имеет две особые (неподвижные) точки: неустойчивый узел в $(0, 0)$ и устойчивый фокус в $(1, 1)$. С учетом (7), вблизи первой $y(r)$ и $x(r)$ должны вести себя как

$$\begin{cases} y \approx 4\pi r^2 \rho_0 / \chi = z^2 / 2 \\ x \approx 4\pi r^2 \rho_0 / 3\chi = z^2 / 6 \end{cases}, \quad \text{где } z = \frac{r}{r_0}. \quad (12)$$

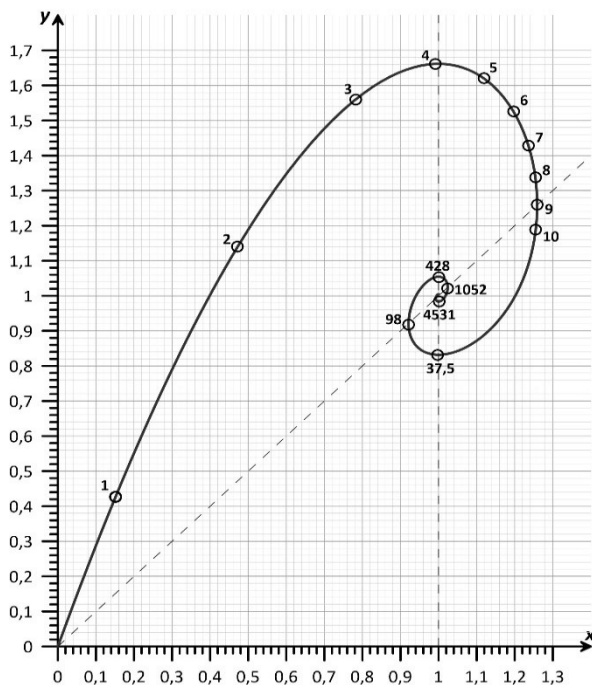


Рис. 1 – Физическая фазовая траектория системы (11). Она всегда пересекает вертикаль $x = 1$ горизонтально, а биссектрису $y = x$ – вертикально. Числа вдоль траектории указывают текущие значения параметра $z = r/r_0$

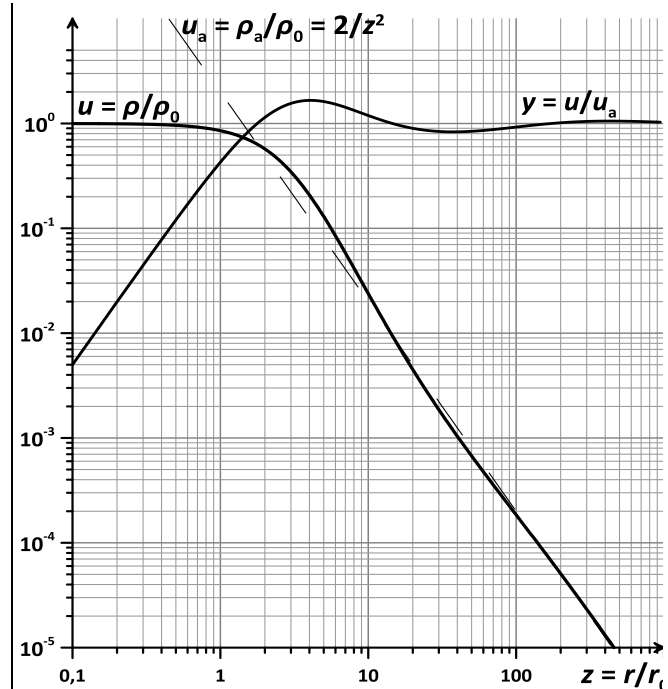


Рис. 2 – Профиль безразмерной плотности $u = \rho/\rho_0$. и ее факторизация на асимптотику u_a (9) и модулятор y (10)

Отсюда следует, что физическое решение на фазовом портрете $y(x)$ представляется траекторией, выходящей из узла $(0, 0)$ с наклоном $dy/dx = 3$. Затем эта траектория сворачивается по спирали к фокусу $(1, 1)$, как показано на рис. 1. Это и означает, что

$$\delta x, \delta y \sim \exp\left(-\frac{1}{2}(1 \pm i\sqrt{7})\tau\right) \sim \frac{1}{\sqrt{r}} \exp\left(\pm i \frac{\sqrt{7}}{2} \ln z\right). \quad (13)$$

Из рис. 1 видно, что, действительно, отклонения x и y от 1 перестают выходить за пределы 8% лишь начиная с $z = 10^2$, а за пределы 1% – с $z = 10^4$. С физической точки зрения неожиданнее и потому интереснее тот факт, что профили массы и плотности сходятся к асимптотике (9) не монотонно, а *осциллируют* вокруг нее, хотя тоже довольно медленно: согласно (13), одна такая осцилляция совершается при росте r в $\exp(4\pi/\sqrt{7}) \approx 116$ раз.

Асимптотики (7) и (9), с учетом (10) и (13) дают достаточно полное *качественное* представление о поведении профилей плотности и массы атмосферы. Однако *количественно* в диапазоне расстояний $0,5 < z < 10^2$, представляющем основной практический интерес, они слишком неточны. Здесь основные уравнения (5) требуют численного интегрирования, результаты которого представлены на рис. 2.

Остается определить масштабы плотности ρ_0 и расстояния r_0 . Для этого перепишем граничное условие (4) в форме $u(z_{up}) = \rho_{up}/\rho_0$, где $z_{up} = r_{up}/r_0$. Умножая это на $z_{up}^2/2$, получим уравнение,

$$\frac{u(z_{up})z_{up}^2}{2} = y(z_{up}) = 4\pi \frac{\rho_{up} r_{up}^2}{\chi}, \quad (14)$$

позволяющее по известным $y(z)$, r_{up} и ρ_{up} определить r_0 и ρ_0 .

Обсуждение результатов

Напомним, что основная методическая цель работы заключается в формировании метаподсказки, которая позволила бы обучающимся анализировать свойства атмосферы Плутонии без обращения к аппарату, им пока недоступному. В качестве основного элемента такой метаподсказки мы предлагаем следующую картину, основанную на результатах выполненных выше вычислений. Курсивом выделены элементы, делающие ее *метаподсказкой*.

Атмосфера Плутонии имеет ядро некоторого радиуса r_0 , в пределах которого плотность воздуха ρ_0 почти постоянна и связана с r_0 вытекающим из (8) соотношением $\rho_0 r_0^2 = RT/4 \mu G$. За пределами ядра плотность начинает убывать, но, *как показывают расчеты*, не экспоненциально, как в атмосфере Олимпис [12], а всего лишь как обратный квадрат расстояния: $\rho(r) \sim r^{-2}$. Если бы эта зависимость была точной, то плотность воздуха у поверхности Плутонии должна была быть в $(r_{up}/r_0)^2$ раз меньше плотности в ядре, а произведение $\rho_{up} r_{up}^2$ имело бы ровно то же значение, что $\rho_0 r_0^2$. Однако *точная зависимость* выглядит чуть иначе:

$$\rho(r)r^2 = \frac{RT}{2\pi\mu G} y\left(\frac{r}{r_0}\right), \quad (15)$$

при больших r физическое решение сходится к асимптотике (9). Скорость сходимости, правда, невелика: если обозначить через x и y малые отклонения x и y от их значений в фокусе, то из (11) получается:

где $y(z)$ – задаваемая графически (рис. 2) модуляционная функция. Подставляя в (15) значения r_{up} и ρ_{up} , по графику $y(z)$ определяем r_{up}/r_0 , отсюда – r_0 , а уже отсюда – ρ_0 .

Информации предыдущего абзаца вполне достаточно для исследования обучающимися разнообразных свойств атмосферы Плутонии в рамках ДАП.

Например, какова зависимость $m(r)$? Поскольку при $r \gg r_0$ модулятор $y = 1$, то масса сферического слоя малой толщины dr не зависит от его радиуса, так что m должно быть прямо пропорционально r , в соответствии с асимптотикой (9).

Тяготение g в таком случае, согласно (2), обратно пропорционально *первой* степени r :

$$g \approx 2RT/\mu r \quad (16)$$

и, как ни странно, не зависит от гравитационной постоянной G . Физическая причина этого станет яснее, если умножить (16) на $2r$. Тогда в левой части получается величина $2gr$, равная квадрату второй космической скорости v_{esc} , а в правой – квадрат характерной скорости теплового движения v_{th} молекул воздуха при температуре T . Другими словами, распределение массы автогравитирующей атмосферы в равновесии автоматически устанавливается таким, чтобы в каждой ее точке за пределами ядра вторая космическая скорость (которая сама по себе определяется тяготением) была равна тепловой скорости молекул, определяемой исключительно температурой. Интересно, что в аэрономии условие $v_{esc} = v_{th}$ используется как определение *экзобазы*, то есть границы, за которой скорости заметной части молекул превышают скорость убегания от источника гравитации [14]. При обычном поведении тяготения ($g \sim r^{-2}$) экзобаза представляет собой *поверхность* (сферу определенного радиуса). Но в Плутонии экзобаза расплывается на весь *объем* атмосферы, кроме центральной области радиусом порядка нескольких r_0 , где существенны отклонения от асимптотики (16).

Укажем еще несколько важных заключений, к которым можно прийти качественными рассуждениями и доступными школьнику выкладками, отталкиваясь от описанной метаподсказки.

1. По мере закачки воздуха в Плутонию его плотность ρ_{up} у поверхности сначала растет, а затем начинает падать.

2. При заданном радиусе Плутонии r_{up} существует некоторая предельно достижимая для равновесной атмосферы плотность ρ_{up} .

3. Указанное в постановке задачи оценочное значение $\rho_{up} = 130 \text{ кг/м}^3$ превышает предельное. Это значит, что при таком ρ_{up} равновесие между давлением *идеального* газа, заполняющего Плутонию, и его собственной гравитацией невозможно.

4. Существует максимально возможная полная масса равновесной атмосферы Плутона. Для $\mu_{\text{пр}} = 6200$ км и $T = 1300$ К она составляет примерно 1% массы реальной Земли.

5. Если значение модулятора u попадает в диапазон $0,83 < u < 1,66$, ему соответствует более одного возможного значения r/l_0 , что может означать появление у автогравитирующей атмосферы метастабильных состояний.

Более развернутое рассмотрение этих результатов, равно как и вызываемых ими физических вопросов, выходит за рамки настоящей работы.

Выводы

Возникшая в ходе методических разработок учебно-исследовательской деятельности школьников задача об атмосфере, подверженной только собственному тяготению, оказалась нетривиальной и непростой, а результаты ее решения – неочевидными, по-

рой неожиданными и представляющими самостоятельный физический интерес. Так, профиль плотности такой атмосферы качественно отличается от обычной барометрической формулы [12], а создаваемое ею тяготение g не зависит от гравитационной постоянной, но зато зависит от температуры. Задача не проста в решении и требует университетского уровня владения математическими методами физики. Однако результаты ее решения могут быть сведены в краткую и доступную пониманию школьников метаподсказку, с помощью которой они могут успешно выполнять учебные исследования в дидактическом аттракторе «Плутона».

Конфликт интересов

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Библиографический список

1. Гейхман Л.К., Кушнина Л.В., Кушнин А.В. Синергетическая педагогика. Пермь, 2011. 176 с.
2. Жилин В.И. Полемиические заметки об использовании понятия «аттрактор» в педагогике // Известия Волгоградского гос. пед. ун-та. 2011. № 4. С. 14–18.
3. Муравьев-Смирнов С.С., Калашников Н.П., Симановский М.А., Калашников Д.С. Практические (семинарские) занятия в динамических группах ИОТ как аттрактор // Физическое образование в вузах. 2023. Т. 29, № 3. С. 19–27.
4. Ньютон И. Математические начала натуральной философии. М., 1989. 688 с.
5. Обручев В.А. Плутона. Земля Санникова. М.: Машиностроение, 1982. 608 с.
6. Свиридов В.В., Свиридова Е.И., Хаджикина В.В. Активизация познавательной деятельности учащихся в рамках проекта «Плутона» // Физика в системе современного образования (ФССО 2019): сб. науч. трудов XV Междунар. конф. Т. 2. СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2019. С. 460–464.
7. Свиридов В.В., Свиридова Е.И. Перспективная образовательная система как сеть аттракторов // Педагогика. Вопросы теории и практики. 2021. Т. 6, № 5. С. 760–768.
8. Свиридов В.В., Свиридова Е.И., Степанова Е.С. Проблема внеземной жизни как дидактический аттрактор в преподавании астрономии и естествознания // Физика в школе. 2022. № 8. С. 50–58.
9. Свиридов В.В., Свиридова Е.И. Физическое путешествие на обратную сторону Земли (тяготение) // Физика в школе. 2024. № 2. С. 55–64.
10. Свиридов В.В., Свиридова Е.И. Физическое путешествие на обратную сторону Земли (энергетика) // Физика в школе. 2024. № 3. С. 55–64.
11. Тарасов Л.В. Недр нашей планеты. М., 2000. 400 с.
12. Тарасов Л.В. Атмосфера нашей планеты. М., 2012. 420 с.
13. Шутенко Е.Н., Шутенко А.И., Сидорчук К.В. Аттрактивные сферы самореализации студентов в вузовском обучении как составляющие пространства их психологического здоровья // PEM: Psychology. Educology. Medicine. 2019. № 4. С. 79–108.
14. Kubyskhina D. Planetary atmospheres through time // Handbook of Exoplanets, 2nd Edition. 2024 (arXiv:2402.13931).

References

1. Geihman, L.K., Kushnina, L.V., Kushnin, A.V. (2011) *Sinergeticheskaya pedagogika* [The Synergetic Pedagogic]. Perm. 176 p. (In Russian)
2. Zhilin, V.I. (2011) Polemicheskie zametki ob ispol'zovanii ponyatiya attractor v pedagogike [Polemic notes about the use of the notion attractor in pedagogy]. *Izvestia Volgograd State Pedagog. University*. (4), 14–18. (In Russian)
3. Muravyov-Smirnov, S.S., Kalashnikov, N.P., Simanovskii, M.A., Kalashnikov, D.S. (2023) Prakticheskie (seminarskie) zanyatiya v dinamicheskikh gruppakh IOT kak attractor [Practical (seminar) classes in dynamic groups as the simplest attractor]. *Fizicheskoe obrazovanie v vuzakh*. 3 (29), 19–27. (In Russian)
4. Newton, I. (1989) *Matematicheskie nachala natural'noj filosofii* [Philosophiæ naturalis principia mathematica]. Moscow, Nauka publ. 688 p. (In Russian)
5. Obruchev, V.A. (1982) *Plutoniya. Zemlya Sannikova* [Plutonia and The Land of Sannikov]. Moscow, Mashinostroyeniye publ. 608 p. (In Russian)
6. Sviridov, V.V., Sviridova, E.I., Khadzhikova, V.V. (2019) *Aktivizatsiya poznavatel'noi deyatel'nosti uchashchikhsya v ramkakh proyekta Plutoniya* [Activating the cognitive activity of students within the framework of the Plutonia project]. In: *XV Internet. conf. "Physics in the system of modern education (PSME-2019)": a collection of contributions. Vol. 2*. Saint-Petersburg, Herzen RSPU publ., pp. 460–464. (In Russian)

7. Sviridov, V.V., Sviridova, E.I. (2021) Perspektivnaya obrazovatel'naya sistema kak set' attraktorov [Advanced educational system as a network of attractors]. *Pedagogy. Theory&Practice*. 5 (6), 760–768. (In Russian)
8. Sviridov, V.V., Sviridova, E.I., Stepanova, E.S. (2022) Problema vnezemnoj zhizni kak didakticheskij attraktor v prepodavanii astronomii i estestvoznaniya [The problem of extraterrestrial life as a didactic attractor in teaching astronomy and natural science]. *Physics in school*. (8), 50–58. (In Russian)
9. Sviridov, V.V., Sviridova, E.I. (2024) Fizicheskoe puteshestvie na obratnuyu storony Zemli (tyagotenie) [A physical journey to the other side of the Earth (gravity)]. *Physics in school*. (2), 55–64. (In Russian)
10. Sviridov, V.V., Sviridova, E.I. (2024) Fizicheskoe puteshestvie na obratnuyu storony Zemli (energetika) [A physical journey to the other side of the Earth (energetics)]. *Physics in school*. (3), 55–64. (In Russian)
11. Tarasov, L.V. (2000) *Nedra nashei planety* [Bowels of our planet]. Moscow, PHYSMATLIT publ. 400 p. (In Russian)
12. Tarasov, L.V. (2012) *Atmosfera nashei planety* [Atmosphere of our planet]. Moscow, PHYSMATLIT publ. 420 p. (In Russian)
13. Shutenko, E.N., Shutenko, A.I., Sidorchuk, K.V. (2019) Attraktivnye sfery samorealizatsii studentov v vyzovskom obuchenii kak sostavlyayushchie prostranstva ikh psikhologicheskogo zdorov'ya [Attractive spheres of students' self-realization within higher education as components of their psychological health space]. *PEM: Psychology. Educology. Medicine*. (4), 79–108. (In Russian)
14. Kubyshkina, D. (2024) Planetary atmospheres through time. In: *Handbook of Exoplanets, 2nd Edition*. (arXiv:2402.13931)

Поступила в редакцию 20.04.2024

Подписана в печать 28.06.2024

Original article

UDC 372.853

DOI: 10.47438/2309-7078_2024_2_73

PROFILE OF AUTOGRAVITATING ATMOSPHERE FOR METHODOLOGICAL DEVELOPMENT OF THE DIDACTIC ATTRACTOR “PLUTONIA”

Yuri A. Pomerantsev¹, Elena I. Sviridova²

Voronezh State Pedagogical University^{1, 2}
Voronezh, Russia

¹Cand. Phys.-Math. Sci., Docent of the Department of General Physics,

ORCID ID: 0009-0007-3827-9691, tel.: (473) 255-47-22, e-mail: pomerant_yu@mail.ru

²Cand. Pedagog. Sci., Docent of the Department of Computer Science, Information Technology
and Digital Education, ORCID ID: 0009-0006-8549-2332, tel.: (473) 255-07-45, e-mail: sei_19@mail.ru

Abstract. As part of the methodological development of the didactic attractor “Plutonia”, based on the idea of the science fiction novel of the same name by Academician Obruchev about a journey into the hollow Earth, the features that the internal atmosphere, influenced only by its own gravitational field, should have due to the physical laws are explored. These features are shown to be non-trivial, sometimes even unexpected. Based on the exact results obtained, a brief meta-hint for students has been constructed, that allows them to pose and resolve various physical questions about the atmosphere of Plutonia with the means available to them.

Key words: didactic attractor, educational research activities, aeronomy, atmosphere, gravity, Plutonia, meta-hint.

Cite as: Pomerantsev, Yu.A., Sviridova, E.I. (2024) Profile of autogravitating atmosphere for methodological development of the didactic attractor “Plutonia”. *Izvestia Voronezh State Pedagogical University*. (2), 73–79. (in Russ., abstract in English). DOI: 10.47438/2309-7078_2024_2_73

Received 20.04.2024

Accepted 28.06.2024