

PERIPATETICUS CREATUS: ГАЛИЛЕЙ ПРОТИВ АРИСТОТЕЛЯ

И. С. ДМИТРИЕВ

Санкт-Петербургский государственный университет

isdmitriev@gmail.com

IGOR DMITRIEV

St. Petersburg State University

PERIPATETICUS CREATUS: GALILEO VS ARISTOTLE

ABSTRACT. The historians of science and philosophers widely believe that Galileo refuted the theory of free fall, as set out by Aristotle in his treatises “On the Heavens” and “Physics”. However, a comparative study of the texts of Galileo and Aristotle shows that they a) considered different physical situations and b) differently understood the term “heaviness”. Besides, one can argue that Galileo actually challenged not the real views and statements of Aristotle and his followers, but a simplistic interpretation of them, common from the Middle Ages to the 16th – the beginning of the 17th centuries.

KEYWORDS: classical mechanics, a free fall, experiment, scientific argumentation.

«С и м п л и ч и о. Прошу вас, синьор Сальвиати, говорите об Аристотеле более почтительно... Сперва надо хорошенько его понять, а потом пытаться опровергнуть».

Галилей 1964. Т. 1. С. 132

Одним из самых известных эпизодов в когнитивной истории науки раннего Нового времени является открытие Галилео Галилеем (1564–1642) в конце XVI столетия закона свободного падения тел. Галилей поставил под сомнение перипатетическое утверждение, будто скорость падения тяжёлого тела пропорциональна его весу. Согласно ученику Галилея Винченцо Вивiani (1622–1703), ученый убедился в ошибке Аристотеля, бросая в 1589 году предметы разного веса с Пизанской башни. Не касаясь вопроса о достоверности рассказа Вивiani (чему посвящена обширная литература¹), обратимся к ар-

¹ Подр. об этой легенде и о галилеевой теории свободного падения см. Cooper 1935; Naylor 1977; Drake 1978; Segre 1989; Damerow *et al.* 1992; Palmieri 2005; Crease 2006.

гументации Галилея, его критике представлений Аристотеля об ускоренном движении тел и рассмотрим, насколько эта критика была оправданной. В наиболее развернутом виде доводы Галилей, касающиеся его теории свободного падения, были изложены им в трактате «*Discorsi e Dimostrazioni matematiche intorno a due Nuove Scienze* (Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых наук)», над которым он работал в 1633 – 1635 годах и который был впервые опубликован в Лейдене в июле 1638 года:

«С а л ь в и а т и. ...Я сильно сомневаюсь, чтобы Аристотель видел на опыте справедливость того, что два камня, из которых один в десять раз тяжелее другого, начавшие одновременно падать с высоты, предположим, ста локтей, двигались со столь различной скоростью, что в то время как более тяжелый достиг бы Земли, более легкий прошел бы всего 10 локтей. [...]

С а г р е д о. ... Я ... уверяю вас, что пушечное ядро весом в сто, двести и более фунтов не опередит и на одну пядь мушкетной пули весом меньше полфунта при падении на землю с высоты двухсот локтей.

С и м п л и ч и о. ... Однако мне все же трудно поверить, что крупинка свинца должна падать с такой же быстротой, как пушечное ядро.

С а л ь в и а т и. Скажите лучше – песчинка с такой же быстротой, как мельничный жернов. Я не хотел бы, синьор Симпличио, чтобы вы поступали как многие другие, отклоняя беседу от главного вопроса Аристотель говорит: „железный стержень, весом в сто фунтов, падая с высоты ста локтей, упадет на землю, в то время как другой, весом в один фунт, пройдет пространство в один локоть". Я утверждаю, что оба упадут одновременно. Проделав опыт, вы найдете, что больший опередит меньший на два пальца, так что когда больший упадет на землю, то меньший будет от нее на расстоянии толщины двух пальцев. Этими двумя пальцами вы хотите закрыть девяносто девять локтей Аристотеля и, говоря о моей небольшой ошибке, умалчиваете о громадной ошибке другого. Аристотель говорит, что тела различного веса движутся в одной и той же среде (поскольку движение происходит от силы тяжести) со скоростями, пропорциональными их весу (*Aristotele pronunzia che mobili di diversa gravità nel medesimo mezzo si muovono (per quanto dipende dalla gravità) con velocità proporzionate a i pesi loro*), и приводит в пример тела, на которых можно проследить чистое, абсолютное влияние веса, отбрасывая в сторону все другие соображения как относительно формы, так и относительно других малозначащих моментов, как-то: легко подвергаются воздействию среды, изменяющей простое действие силы тяжести ...²

Насколько справедливы упреки Галилея в адрес Аристотеля? В чем был прав, а в чем действительно ошибался Аристотель? Для ответа на эти вопросы обратимся к трактатке свободного падения Стагиритом.

² Галилей 1964, 2, 164–167; Galilei 1898, 8, 106–109.

Начнем с часто цитируемого фрагмента из четвертой книги его трактата «О небе», где критикуется теория, «согласно которой между пустотой и полнотой [в телах] имеется определенная пропорция»: «и в большем и в меньшем количестве огня соотношение плотного вещества и пустоты будет одним и тем же. Но большее количество огня движется вверх быстрее меньшего, и точно так же большее количество золота, свинца или любого другого тяжелого [тела] [быстрее движется] вниз. А между тем этого не должно было бы происходить, коль скоро легкость и тяжесть определяются указанным [соотношением]». ³ Аналогичное утверждение встречаем в другом фрагменте трактата: «чем большее количество огня и чем большее количество земли, тем быстрее они движутся в свое собственное место (τὸ πλείον πῦρ θάπτον φέρεται καὶ ἡ πλείων γῆ εἰς τὸν αὐτῆς τόπον)». ⁴ Заметим, что речь в приведенном тексте не идет о *пропорциональности* «быстроты» движения тяжести (или легкости) тела, но лишь о том, что более тяжелое тело движется быстрее легкого. Не вполне ясно также (особенно в контексте нижеприведенных цитат), что в этом фрагменте означают слова «πλείον πῦρ» и «πλείων γῆ».

Однако в других фрагментах Аристотель конкретизирует свою трактовку свободного падения. Приведу два характерных примера из «Физики» и «О небе»:

1) «...Все сказанное вытекает из различий среды, через которую перемещаются [тела]... . Мы видим, что тела, имеющее большую силу тяжести или легкости, если в остальном имеют одинаковую фигуру (ἐὰν τὰλλα ὁμοίως ἔχη [τοῖς σχήμασι]), скорее проходят равное пространство в том [числовом] отношении, в каком указанные величины находятся друг к другу». ⁵

2) «Если такая-то тяжесть проходит такое-то расстояние за такое-то время, то такая-то плюс N – за меньшее и пропорция, в которой относятся между собой времена, будет обратной к той, которой относятся между собой тяжести. Например, если половинная тяжесть – за такое-то [время], то целая – за его половину (Εἰ γὰρ τοσόνδε βάρος τὴν τοσήνδε ἐν τῷδε τῷ χρόνῳ κινεῖται, τὸ τοσοῦτον καὶ ἔτι ἐν ἐλάττονι, καὶ τὴν ἀναλογίαν ἦν τὰ βάρη ἔχει, οἱ χρόνοι ἀνάπαλιν ἐξουσιν, οἷον εἰ τὸ ἡμισυ βάρος ἐν τῷδε, τὸ διπλάσιον ἐν ἡμίσει τούτου)». ⁶

Из этих цитат видно, что Аристотель рассматривает движение тел в определенной среде. Это следует также из того, что, согласно его учению, естественное движение в пустоте должно было бы происходить с беско-

³ *О небе* Δ2 309b9–15; здесь и далее пер. А. В. Лебедева.

⁴ Там же, А8 277b4–5.

⁵ *Физика* Δ8 216a12–16; пер. В. П. Карпова.

⁶ *О небе* А6 273b30–274a2.

нечной скоростью, что невозможно.⁷ Но тогда, с ретроспективной точки зрения, Стагирит прав. Действительно, для сферической частицы, падающей в вязкой среде под действием собственной тяжести справедлив закон Стокса (1851):

$$V_s = (\rho_p - \rho_f)(2r^2g/9\eta),$$

где V_s – установившаяся скорость частицы; r – радиус частицы; g – ускорение свободного падения; ρ_p – плотность частицы; ρ_f – плотность среды; η – динамическая вязкость среды.

В случае, когда $\rho_p > \rho_f$ (как, например, при движении плотного тела в воздухе), получаем:

$$V_s = 2r^2g\rho_p/9\eta = (1/6\pi\eta)(P/r),$$

где $P = (4/3)\pi r^3\rho_p g$ – вес частицы, т. е. скорость падения частицы прямо пропорциональна ее весу, или, если несколько уменьшить градус модернизации (неизбежной при ретроспективном подходе), то можно символически представить рассматриваемый случай свободного падения следующим образом:

$$t \sim 1/P,$$

где t – время падения тела в сопротивляющейся среде.

Разумеется, во времена Галилея закон Стокса был неизвестен, но вряд ли Галилей никогда не видел, как тяжелое тело падает в воде. Однако, как бы то ни было, Галилей и Аристотель обсуждали *разные* случаи падения тела, точнее, разные физические ситуации, и каждый из них по отношению к рассматриваемой им ситуации был прав, что было отмечено еще С. Тулминым, правда, без детализированной аргументации.⁸ Но ставить на этом точку было бы преждевременным.

Обратимся к рассуждениям Аристотеля о «тяжести и легкости» из четвертой книге трактата «О небе»:

Рассмотрим тяжелое и легкое: что есть каждое из них, какова их природа и по какой причине они обладают этими способностями? Рассмотрение их имеет

⁷ «Доказательством того, что пространственное движение не продолжается в бесконечность, служит также тот факт, что земля движется тем быстрее, чем она ближе к центру, а огонь – тем быстрее, чем ближе он кверху. Если бы они двигались в бесконечность, то бесконечной была бы и скорость, а если скорость, то и тяжесть и легкость. В самом деле, как скорость, достигнутая одним телом благодаря более низкому положению, могла бы быть достигнута другим благодаря тяжести, так, в случае если возрастание тяжести было бы бесконечным, возрастание скорости также было бы бесконечно» (*О небе* А8 277a28–35).

⁸ Toulmin 1961, 50.

непосредственное отношение к исследованиям о движении, так как тяжелым или легким мы называем нечто по его способности к тому или иному естественному движению (βαρὺ γὰρ καὶ κοῦφον τῷ δύνασθαι κινεῖσθαι φυσικῶς πῶς λέγομεν).⁹

Таким образом, тяжесть и легкость определяются Аристотелем не в терминах силового взаимодействия, как это потом будет сделано в работах И. Ньютона (1642–1727), но как способность к тому или иному типу естественного движения, т. е. движения тела к своему естественному месту. Далее Аристотель конкретизирует эту дефиницию, выделяя два аспекта понятий «тяжелое» и «легкое»: «Тяжелым или легким нечто называется: [1] в абсолютном смысле, [2] относительно другого, ибо об одном из [двух] тяжелых предметов мы говорим, что он “легче”, о другом – что он “тяжелее”, как, например, медь [тяжелее] дерева».¹⁰

Иными словами, если имеется два тела одинаковой формы, состоящие из разных материалов (т. е. из субстанций разного элементного состава), то для определения того, какое из них тяжелее, необходимо рассмотреть их естественное движение (движение к центру Земли), т. е. свободное падение. То тело, которое преодолет некоторое фиксированное расстояние за меньшее время, следует считать более тяжелым. В приведенных выше цитатах Аристотель дал *операциональное* определение относительно тяжелого (легкого) тела: более тяжелым является то, которое падает быстрее:

В абсолютном смысле мы называем легким то, что движется к [абсолютному] верху и к внешнему краю, тяжелым – то, что к абсолютному низу и к центру, а легким по отношению к другому или более легким – то из двух равных по объему тяжелых тел, которое при естественном падении вниз опережается другим.¹¹

Однако, как уже было сказано, Стагирит рассматривает движение в определенной среде и это обстоятельство вносит в его анализ свободного падения свои нюансы. Допустим, два шара, сделанных из разных материалов, падают на поверхность земли в воздухе с одинаковой высоты h . Допустим далее, что шар «1» проходит расстояние h в два раза быстрее, чем шар «2», т. е. $t_2 = 2t_1$. Следовательно, в согласии с определением Аристотеля, первый шар в два раза тяжелее второго: $P_1 = 2P_2$.

Вместе с тем, по мысли Аристотеля, может случиться так, что при падении в другой среде, скажем, в воде, времена падения этих шаров изменятся и, к примеру, $t_1 = 2t_2$, откуда следует, что в этой среде $P_2 = 2P_1$.

⁹ *О небе* Δ1 307b29–34.

¹⁰ Там же, 308a 8–10.

¹¹ Там же, 308a 29–34.

Поскольку, тяжесть (легкость) тела определяется в натурфилософии Аристотеля его элементарным составом, то, естественно, Стагирит приходит к следующему выводу:

То, что одни и те же [тела] не везде оказываются тяжелыми или легкими, объясняется различием первичных [тел]. Например, в воздухе кусок дерева весом в один талант окажется тяжелее, чем кусок свинца весом в одну мину, а в воде – легче. Причина та, что все [элементы], кроме огня, имеют тяжесть и все, кроме земли, – легкость. Поэтому земля и [тела], которые содержат наибольшее количество земли, должны иметь тяжесть везде; вода – везде, кроме земли; воздух – [везде], кроме воды и земли. Ибо, за исключением огня, все [элементы] имеют тяжесть в своем собственном месте – даже воздух. Свидетельство тому: надутый мех весит больше пустого. Поэтому если нечто содержит больше воздуха, чем земли и воды, то в воде оно может быть легче чего-то другого, а в воздухе – тяжелее, ибо на поверхность воздуха оно не поднимается, а на поверхность воды поднимается.¹²

Заметим, Аристотель нигде не оговаривает, что два сравниваемых тела должны иметь одинаковый объем, поскольку для него время падения зависит от элементного состава тел и среды, в которой они движутся, а не от того, что мы сегодня называем массой тела и его плотностью,¹³ а потому в данной среде два тела одинакового состава будут иметь одинаковую способность к естественному движению, т. е. будут падать с одной и той же высоты за одинаковое время.

Теперь вернемся к тексту «Discorsi». С целью опровергнуть вышеприведенные утверждения Аристотеля, в первую очередь его мысль, представленную выше формулой $t \sim 1/P$, Галилей рассматривает мысленный эксперимент с падением двух камней:

С а л ь в и а т и. ... Если мы имеем два падающих тела, естественные скорости которых различны, и соединим движущееся быстрее с движущимся медленнее, то ясно, что движение тела, падающего быстрее, несколько задержится, а движение другого несколько ускорится. Вы не возражаете против такого положения?

С и м п л и ч и о. Думаю, что это вполне правильно.

С а л ь в и а т и. Но если это так, и если вместе с тем верно, что большой камень движется, скажем, со скоростью в восемь «градусов», тогда как другой, меньший, – со скоростью в четыре «градуса», то соединяя их вместе, мы должны получить скорость, меньшую восьми «градусов»; однако! два камня, соединенные вместе, составляют тело больше первоначального, которое имело ско-

¹² Там же, Δ4 зпв2–13.

¹³ Аристотель делает оговорку относительно одинаковости (или подобия) «фигур» сравниваемых падающих тел (см. тест при сноске 5), поскольку от формы тела зависит сопротивление среды его движению.

рость в восемь «градусов»; следовательно, выходит, что более тяжелое тело движется с меньшей скоростью, чем более легкое; а это противно вашему предположению. Вы видите теперь, как из положения, что более тяжелые тела движутся с большей скоростью, чем легкие, я мог вывести заключение, что более тяжелые тела движутся менее быстро.

С и м п л и ч и о. Я чувствую себя совершенно сбитым с толку...¹⁴

А что, собственно, так обескуражило Симпличио? Ясно, что этот персонаж, будучи порождением фантазии Галилея, говорит то, что отвечает общему замыслу «*Discorsi*». Полагаю, что реального аристотелианца доводы Сальвиати (рупора Галилея) вряд ли бы убедили и уж тем более, вряд ли бы сбили с толку. Действительно, Галилей в своих рассуждениях полагает, что два тела, связанные вместе, тяжелее, чем каждое, взятое по отдельности. Для Аристотеля же, тяжесть, согласно данному им операциональному определению – это мера интенции тела двигаться к своему естественному месту, т. е. падать, в данной среде, и эта интенция (способность) тела определяется его элементным составом. Если оба камня составлены из одного и того же материала и оба падают в воздухе, то их способность к свободному падению (к движению к естественному месту), по мысли Стагирита, одинакова, и потому два одинаковых по составу связанных камня падают с некоторой фиксированной высоты за то же время, что и каждый камень по отдельности (с точностью до различий в сопротивлении воздуха, обусловленных различиями в форме камней), независимо от того, какой камень больше, т. е. независимо, как бы мы сегодня сказали, от их масс (весов). Камень же с другим элементным составом, скажем, с меньшим содержанием земли, будет падать медленнее, а потому его следует считать менее тяжелым. Именно так и должен был бы ответить истинный аристотелианец Сальвиати-Галилею.

Но Галилей мыслил в другой «системе координат», оперируя с иным пониманием «тяжести» тел, которое затем получит свое более отчетливое выражение в механике Ньютона: не потому тело «1» тяжелее тела «2», что оно падает быстрее по причине содержания в нем более тяжелых элементов (земли, воды) или большего их количества, а, наоборот, если масса тела «1» больше массы тела «2», то первое имеет больший вес ($P=mg$) по сравнению со вторым, тогда как ускорение свободного падения в данной точке земного шара постоянно и от величины P (и m) не зависит (если, разумеется, пренебречь сопротивлением среды).

Таким образом, отстаивая свою точку зрения на свободное падение, Галилей, который оспаривал мнения *современных* ему перипатетиков

¹⁴ Галилей 1964, 2, 165.

(например, Чезаре Кремонини (1550–1631)), приписал Аристотелю то, что тот никогда не утверждал.

БИБЛИОГРАФИЯ

Источники

- Аристотель. (1981) «Физика». *Сочинения в четырех томах*. Москва: Мысль. Том 3, 59–262; пер. с древнегреч. В. П. Карпова.
- Аристотель. (1981) «О небе». *Сочинения в четырех томах*. Москва: Мысль. Том 3, 263–378; пер. с древнегреч. А. В. Лебедева.
- Галилей, Г. (1964) «Беседы и математические доказательства, касающиеся двух новых областей науки, относящихся к механике и местному движению... с приложением о центрах тяжести различных тел». *Избранные труды в 2-х томах*. Составитель У. И. Франкфурт. Москва: Наука. Т. 2, 108–419; перевод С. Н. Долгова.
- Галилей, Г. (1964) «Диалог о двух главнейших системах мира – Птолемеевой и Коперниковой». *Избранные труды в 2-х томах*. Составитель У. И. Франкфурт. Москва: Наука. Т. 1, 97–555; перевод А. И. Долгова.
- Aristotle (1939) *On the Heavens* (Περὶ οὐρανοῦ). Greek and English on opposite pages. English Translation by W. K. C. Guthrie. Cambridge, Mass; London: Harvard University Press: W. Heinemann Ltd. (Loeb classical library; no. 338), 41–346.
- Aristotle (1957) *The Physics*. Parallel Greek and English text, commentaries in English. Translation by Philip H. Wicksteed and Francis M. Cornford. Books 1–4. (The Loeb Classical Library; 228). Cambridge, Mass.; London: Harvard University Press.
- Galilei, G. (1638) *Discorsi e dimostrazioni matematiche: intorno à due nuoue scienze, attenenti alla mecanica & i movimenti locali. Del signor Galileo Galilei Linceo, filosofo e matematico primario del serenissimo Grand Duca di Toscana. Con una appendice del centro di grauità d'alcuni solidi*. In Leida: Appresso gli Elsevirii.
- Galilei, G. (1898) *Discorsi e dimostrazioni matematiche: intorno à due nuoue scienze, attenenti alla mecanica & i movimenti locali*, A. Favaro direttore. Galilei, G. (1890–1909) *Le opere*. Firenze: G. Barbera Editore. Vol. 8, 41–346.

Исследования

- Cooper, L. (1935) *Aristotle, Galileo, and the Tower of Pisa*. Ithaca, N.Y.: Cornell University Press; London: H. Milford, Oxford University Press.
- Crease, R. P. (2006) “The Legend of the Leaning Tower,” L. E. Hall, ed., *The Laws of Motion. An Anthology of Current Thought*. New York: The Rosen Publ., 8–14.
- Damerow, P., Freudenthal, G., McLaughlin, P., Renn, J. (1992) *Exploring the Limits of Pre-classical Mechanics: A Study of Conceptual Development in Early Modern Science: Free Fall and Compounded Motion in the Works of Descartes, Galileo, and Beekman*. New York, Berlin: Springer-Verlag.
- Drake, S. (1978) *Galileo at Work. His Scientific Biography*. Chicago: University of Chicago Press.
- Naylor, R. H. (1977) “Galileo’s theory of motion: process of conceptual change in the period 1604–1610,” *Annals of Science* 34.4, 365–392.

- Palmieri, P. (2005) "Galileo's Construction of Idealized Fall in the Void," *History of Science* 43.4, 343–389.
- Segre, M. (1989) "Galileo, Viviani and the tower of Pisa," *Studies in History and Philosophy of Science. Part A*, 20.4, 435–451.
- Toulmin, S. (1961) *Foresight and Understanding: An Enquiry into the Aims of Science*. Foreword by Jacques Barzun. Bloomington: Indiana University Press.