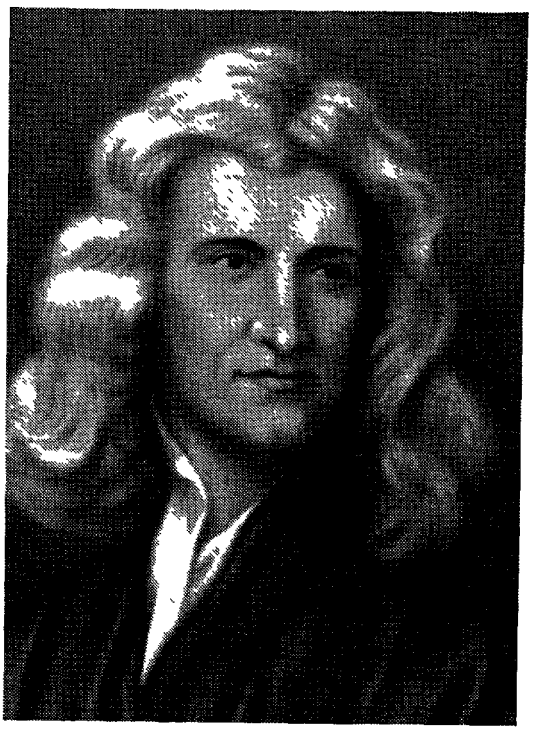

ИСААК НЬЮТОН
(1643—1727)

*1987 г. Январь* *Том 151, вып. 1*

*УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК*

ИЗ ИСТОРИИ ФИЗИКИ

53(092)

# К ТРЕХСОТЛЕТИЮ «МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАЧАЛ НАТУРАЛЬНОЙ ФИЛОСОФИИ» ИСААКА НЬЮТОНА

*В. Л. Гинзбург*

«Пусть смертные радуются, что существовало такое украшение рода человеческого».
(*Из эпитафии на надгробном, памятнике Исааку Ньютону*)

В 1987 г. исполняется 300 лет со времени опубликования «Математических начал натуральной философии» Исаака Ньютона *). Лагранж назвал эту книгу «величайшим произведением человеческого ума», и, безусловно, по любой разумной оценке речь идет об одном из крупнейших достижений в области физики и естествознания в целом за всю историю их развития. В «Началах» была впервые в систематической и достаточно полной форме изложена классическая механика, часто именуемая также ньютоновской механикой. Именно с механики — ньютоновской механики — начинают изучать физику в школе, ей же открываются курс общей физики и kvpc теоретической физики в высших учебных заведениях (см., например, [2,3]). Помимо механики и ее применений в астрономии, Ньютон получил очень важные результаты в оптике и заложил основы математического анализа (имеется в виду дифференциальное и интегральное исчисления). В таких условиях, естественно, имя Ньютона известно практически всем. Но столь же, пожалуй, естественно, что сегодня — через 300 лет после появления «Начал» и через 260 лет после смерти Ньютона **) — о его работах в их оригинальной форме у нас знают сравнительно немногие ***). Поэтому представляется уместным воспользоваться таким поводом, как юбилей «Начал», для того, чтобы хотя бы кратко остановиться на исследованиях Ньютона, особенно в области механики.

---

*) Newton I. Philosophiae Naturalis Principia Mathematica.— 1687. Это латинское название можно перевести, например, и так: «Математические основы естествознания», ибо в то время термин «натуральная философия», или «философия природы», был примерно равнозначен термину «естествознание». Принятое у нас заглавие «Математические начала натуральной философии» следует переводу А. Н. Крылова [1].

**) Исаак Ньютон родился 4 января 1643 г. и скончался 31 марта 1727 г. по новому стилю (т. е. по григорианскому календарю). По старому стилю — по юлианскому календарю, который использовался в Англии до 1752 г.,— Ньютон родился 25 декабря 1642 г. и скончался 20 марта 1727 г.

***) Не говоря уже о том, что перевод «Начал» на русский язык [1] мало доступен, эту великую книгу трудно читать. Переписка Ньютона и ряд других материалов, характеризующих его деятельность, были опубликованы лишь недавно [4]; то же можно сказать о подробной биографии [8]. На русском языке можно указать на биографию [6], брошюру [7], сборник [8] и реферативный сборник [9].

## ДО НЬЮТОНА

История физики и астрономии прослеживается на протяжении двух тысячелетий до Ньютона. Наиболее яркие и известные имена на этом пути: Аристотель (384—322 до н. э.), Архимед (около 287—212 до н. э.), Гиппарх (II век до н.э.), Птолемей (около 87—165), Коперник (1473—1543), Галилей (1564-1642), Кеплер (1571-1630), Декарт (1596-1650) и Гюйгенс (1629-1695) — старший современник Ньютона. Разумеется, этот список можно было бы пополнить целым рядом достойных имен (см., например, [10,11]), но здесь это вряд ли уместно — наша цель ограничивается в основном напоминанием шкалы времени.

Для античной механики характерны такие утверждения: скорость тела пропорциональна приложенной к нему силе, а при падении на землю тела приобретает скорость, пропорциональную его весу. Как мы знаем, и то и другое может быть справедливо лишь при движении в достаточно вязкой среде или, точнее, когда произведением массы на ускорение можно пренебречь по сравнению с силой вязкого трения. Античная механика являлась, таким образом, обобщением некоторого класса опытов или повседневных наблюдений; например, лист с дерева падает медленнее камня или груши. Прошли века, прежде чем Галилей, имевший в этом вопросе предшественников [10], сделал заключение, что все тела падают с одинаковым ускорением, не зависящим от их веса, т. е. при падении с высоты достигают земли за одинаковое время и с одинаковой скоростью (конечно, это справедливо лишь в условиях, когда сопротивление воздуха незначительно). Галилей пришел и к закону инерции, согласно которому при отсутствии сил тело сохраняет свою скорость или, точнее (в масштабах расстояний, достижимых на земной поверхности) движется равномерно и прямолинейно. Галилей сформулировал также принцип относительности, или конкретно, утверждение о равноправности при рассмотрении движения тел некоторых систем отсчета, скажем, связанных с берегом или с равномерно движущимся кораблем. Не будем приводить цитат, подробнее освещающих соответствующие утверждения и аргументацию Галилея, поскольку это уже неоднократно делалось (см. [10,12] и указанную там литературу, а также [34]). Менее известно, по-видимому, что принцип относительности в механике почти за столетие до Галилея в такой же форме использовался Коперником в качестве довода в пользу движения Земли. Действительно, Коперник замечает: «И почему нам не отнести видимость суточного вращения к небу, а его действительность к Земле? ... Потому что, когда корабль идет по спокойной воде, все, что находится вне его, представляется морякам движущимся в соответствии с движением корабля; сами же они со всем, с ними находящимся, будто бы стоят на месте» (подробнее см. [13]). Не менее важен для развития был, разумеется, и переход к гелиоцентрической системе. Правда, у Коперника, а также у Галилея сохранилось догматическое предположение о равномерном движении планет и их спутников обязательно по окружностям (с этим предположением связана необходимость сохранения эпициклов). Однако лишь переход к гелиоцентрической системе позволил Кеплеру установить в 1609 г. первые два закона, а в 1619 г.— третий закон планетных движений. Только на основе законов Кеплера Ньютону в «Началах» удалось в сколько-нибудь законченной и общей форме открыть закон всемирного тяготения. Такая выдающаяся роль, которую сыграли законы Кеплера, побуждает их напомнить:

1. Планеты движутся по эллипсам, причем Солнце находится в одном из фокусов эллипсов.

2. Радиус-вектор планеты (или, другими словами, прямая линия, соединяющая планету и Солнце) в равные времена описывает равные площади (закон площадей).

3. Квадраты времени обращений планет $T$ относятся как кубы больших полуосей $a$ эллиптических орбит, по которым они движутся вокруг Солнца.

Другими словами, для всех планет Солнечной системы $a^3/T^2 = K$, где $K$ — постоянная Кеплера (одинаковая для всех планет Солнечной системы, но другая для иных аналогичных систем, например для системы спутников Юпитера) *).

Кеплер пришел к своим законам, отказавшись от равномерного движения по окружностям и тем самым преодолев барьер огромной важности, просуществовавший почти два тысячелетия. Эйнштейн, характеризуя достижения Кеплера, употребляет такие термины, как «поистине гениальная идея» и «замечательный выход», пишет о «восхищении перед этим замечательным человеком» ([14], с. 121, 324). Здесь нет преувеличения, знакомство с трудами и жизнью Кеплера [13] не может не вызвать чувства самого глубокого уважения.

Кеплер задумывался и о причинах, приводящих к движению планет и Луны по орбитам или, если угодно, о природе тяготения: «Гравитацию (тяготение) я определяю как силу, подобную магнетизму — взаимному притяжению. Сила притяжения тем больше, чем оба тела ближе одно к другому. Поэтому тела сильнее сопротивляются отдалению друг от друга, если они еще близки одно к другому». И далее: «Причины океанских приливов и отливов видим в том, что тела Солнца и Луны притягивают воды океана с помощью сил, подобных магнетизму» (см. [13], с. 105, где приведены и ссылки на оригинальные работы Кеплера). Правда, Кеплер считал, что сила притяжения (сила всемирного тяготения) хотя и пропорциональна массе (скажем это современным языком), но обратно пропорциональна расстоянию между телами. К правильной зависимости силы тяготения от расстояния — закону $F \backsim 1/r^2$ — также пришли до Ньютона. Он сам в этой связи упоминает имена Буллиальда (латинизированная фамилия француза Буйо, 1605—1694; закон $1/r^2$ фигурировал в его книге, опубликованной в 1645 г.), Борелли и Гука. До Ньютона была известна и формула $w = v^2/r$ для центростремительного ускорения (ее еще в 1659 г. получил Гюйгенс, но опубликован этот результат был только в его книге «Часы с маятником» в 1673 г.). Сочетание закона для силы $F \backsim 1/r^2$ и формулы для центростремительного ускорения $w$ позволяет найти третий закон Кеплера для круговых орбит, когда

$$v = \frac{2\pi}{T} r \quad \text{и} \quad w = \frac{4\pi^2}{T^2} r \backsim F \backsim \frac{1}{r^2} \quad (\text{в этом случае, очевидно, } r = a).$$

Это и было сделано Ньютоном в 1665—1666 гг.—в знаменательные годы его жизни, когда во время эпидемии чумы 22-летний Ньютон жил на ферме в родном Вульстропе. «Я в то время был в расцвете моих изобретательских сил и думал о математике и философии больше, чем когда либо после»,— писал Ньютон много лет спустя. В этот период, согласно широко распространенному рассказу, Ньютон пришел к закону всемирного тяготения, на что его навело падение яблока с дерева. Иногда к такому утверждению относятся как к легенде, но С. И. Вавилов склонен считать рассказ достоверным и приводит его [6] со слов Стекелея, описавшего такую сцену, относящуюся, правда, к старости Ньютона **): «После обеда (в Лондоне, у Ньютона) погода была жаркая; мы перешли в сад и пили чай под тенью нескольких яблонь; были только мы вдвоем. Между прочим сэр Исаак сказал мне, что точно в такой же обстановке он находился тогда, когда впервые ему пришла в голову мысль о тяготении. Она была вызвана падением яблока, когда он сидел, погрузившись в думы, Почему яблоко всегда падает отвесно, подумал он про

*) У Кеплера вместо большой полуоси фигурировало среднее расстояние между Солнцем и планетой, что одно и то же. Второй закон Кеплера был им установлен в конце 1601-го или начале 1602 г., а первый закон — в 1605 г. Указанная выше дата (1609 г.) относится ко времени опубликования Кеплером «Новой астрономии», содержавшей два его первых закона [13]. Разумеется, в настоящей статье мы не всегда сможем делать подобные уточнения, несущественные для понимания сути дела.

**) Беседа со Стекелеем (на современном языке — с Вильямом Стекли, врачом, членом Королевского общества) состоялась 15 апреля 1726 г. [16], когда Ньютону было уже 83 года.

себя, почему не в сторону, а всегда к центру Земли. Должна существовать притягательная сила в материи, сосредоточенная в центре Земли. Если материя так тянет другую материю, то должна существовать пропорциональность ее количеству. Поэтому яблоко притягивает Землю так же, как Земля яблоко. Должна, следовательно, существовать сила, подобная той, которую мы называем тяжестью, простирающаяся по всей вселенной». Аналогичен более известный рассказ Вольтера со слов племянницы Ньютона.

За последнее десятилетие ньютоноведение сделало большой шаг вперед [4,5,9], но автор настоящей статьи не имел возможности ознакомиться с соответствующими оригинальными материалами. Приходится поэтому ограничиться замечанием, что результаты, полученные Ньютоном в 1665—1666 гг., тогда опубликованы не были, долгое время о них практически никто не знал. Между тем проблема тяготения и теоретического обоснования законов Кеплера становилась все более актуальной, довольно широко обсуждалась в научных кругах (конкретно, речь идет о Королевском обществе, основанном в Лондоне в 1662 г. и с 1665 г. издававшем первый в мире научный журнал на английском языке «Philosophical Transections of the Royal Society»; Ньютон был избран членом общества в 1672 г.). Третий закон Кеплера для круговых орбит был получен на основе выражений $F \backsim 1/r^2$ и $w = v^2/r$ (см. выше), вероятно, независимо несколькими авторами. Камнем преткновения явился вывод первого закона Кеплера, т. е. доказательство того, что под действием силы, обратно пропорциональной квадрату расстояния, возникает (или, точнее, может иметь место) движение по эллипсу. В 1684 г. Галлей (1656—1742; его имя хорошо всем нам известно, ибо именно в его честь названа комета Галлея) из разговора с Ньютоном узнал, что последний уже давно знает искомое доказательство (вывод) первого закона Кеплера. Галлей счел, и с полным основанием, результаты Ньютона исключительно важными для развития небесной механики и побудил (как утверждают, даже уговорил) Ньютона опубликовать наконец некоторые работы по механике. Так родились «Начала», состоящие из трех книг. Они были получены в Королевском обществе соответственно весной и осенью 1686 г. и в апреле 1687 г. За отсутствием у общества денег Галлей издал (в 1687 г.) «Начала» за свой очет в количестве 300—400 экземпляров. Издание разошлось довольно быстро (в 1691 г. оно уже исчезло с книжного рынка), но, по оценке И. Ю. Кобзарева [7], первое издание «Начал» изучали в тот период человек 40 во всей Европе, а в Англии и того меньше — всего человек 10. При жизни Ньютона «Начала» вышли еще два раза — в 1713 и 1726 гг.

## «НАЧАЛА»

«Если я видел дальше других, то потому, что стоял на плечах гигантов»,— этими словами Ньютона можно в какой-то мере подытожить сказанное в предыдущем разделе. В области механики и теории тяготения Ньютон опирался на сделанное Коперником, Галилеем и Кеплером (и, разумеется, другими, чьи имена менее известны), развил и в определенном смысле завершил их труды. Эйнштейн даже назвал Ньютона «великим систематизатором» ([14], с. 90). Действительно, «Математические начала натуральной философии» — фундаментальный, можно сказать, монументальный труд (в русском переводе этой книги [1] почти 700 страниц), охватывающий многое сделанное до Ньютона, его современниками и им самим. Но главное все же не в систематизации, хотя и это имело немалое значение. Главное, во-первых,— в общем подходе — в использовании упоминаемого ниже «метода принципов». Главное, во-вторых,— в существенном развитии и обобщении механики, включая сюда формулировку закона «всемирного тяготения» в универсальном виде. Главное, в-третьих,— решение целого ряда труднейших по тем временам задач, например касающихся движения Луны. О реальном решении

таких задач до Ньютона не могло быть и речи. Несомненно, правильнее считать главным что-то одно и упоминание трех главных элементов «Начал» звучит не лучшим образом (чем-то это напоминает использование термина «первый заместитель» в применении не к одному, а сразу к нескольким лицам). Но дело не в терминологии, на ней не будем настаивать, а в многогранности и величии «Начал».

Мы не можем продвинуться дальше без того, чтобы не остановиться на содержании «Начал» (как сказано, на русском языке «Начала» трудно доступны). Если не касаться предисловия автора, а во втором издании (1713 г.) — и большого «предисловия издателя» (Р. Котса), «Начала» открываются «Определениями» и «Аксиомами и законами движения». Затем следует книга I «О движении тел», книга II «О движении тел» (в отличие от книги I здесь учитывается сопротивление, т. е. трение) и книга III «О системе мира». Приведем теперь ряд отрывков (цитируем по [1]).

*«ОПРЕДЕЛЕНИЯ*

Определение I

*Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее.*

Воздуха двойной плотности в двойном объеме вчетверо больше, в тройном — вшестеро. То же относится к снегу или порошкам, когда они уплотняются от сжатия или таяния. Это же относится и ко всякого рода телам, которые в силу каких бы то ни было причин уплотняются. Однако при этом я не принимаю в расчет той среды, если таковая существует, которая свободно проникает в промежутки между частицами. Это же количество я подразумеваю в дальнейшем под названием *тело* или *масса*. Определяется масса ло весу тела, ибо она пропорциональна весу, что мною найдено опытами над маятниками, произведенными точнейшим образом, как о том сказано лиже.

Определение II

*Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе.*

Количество движения целого есть сумма количеств движения отдельных частей его, значит, для массы, вдвое большей, при равных скоростях оно двойное, при двойной же скорости — четверное.

Определение IV

*Приложенная сила есть действие, производимое над телом, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.*

Сила проявляется единственно только в действии и по прекращении действия в теле не остается. Тело продолжает затем удерживать свое состояние вследствие одной только инерции. Происхождение приложенной силы может быть различное: от удара, от давления, от центростремительной силы.

. . . . . .

*ПОУЧЕНИЕ*

В изложенном выше имелось в виду объяснить, в каком смысле употребляются в дальнейшем менее известные названия. Время, пространство, место и движение составляют понятия общеизвестные.

Однако необходимо заметить, что эти понятия обыкновенно относятся к тому, что постигается нашими чувствами. Отсюда происходят некоторые неправильные суждения, для устранения которых необходимо вышеприведенные понятия разделить на абсолютные и относительные, истинные и кажущиеся,, математические и обыденные.

I. *Абсолютное, истинное математическое* время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему протекает равномерно и иначе называется длительностью.

*Относительное, кажущееся или обыденное* время есть или точная, или изменчивая, постигаемая чувствами, внешняя, совершаемая при посредстве какого-либо движения мера продолжительности, употребляемая в обыденной жизни вместо истинного математического времени, как-то: час, день, месяц, год.

П. *Абсолютное пространство* по самой своей сущности, безотносительно к чему бы то ни было внешнему остается всегда одинаковым и неподвижным.

*Относительное* есть его мера или какая-либо ограниченная подвижная часть, которая определяется нашими чувствами по положению его относительно некоторых тел и которое в обыденной жизни принимается за пространство неподвижное: так, например, протяжение пространств подземного воздуха или надземного, определяемых по их положению относительно Земли.

. . . . . .

IV. *Абсолютное движение* есть перемещение тела из одного абсолютного его места в другое, *относительное* — из относительного в относительное же. Так, на корабле, идущем под парусами, относительное место тела есть та часть корабля, в которой тело находится, например та часть трюма, которая заполнена телом и которая, следовательно, движется вместе с кораблем. Относительный покой есть пребывание тела в той же самой области корабля или в той же самой части его трюма.

Истинный покой есть пребывание тела в той же самой части того неподвижного пространства, в котором движется корабль со всем, в нем находящимся. Таким образом, если бы Земля в самом деле покоилась, то тело, которое по отношению к кораблю находится в покое, двигалось бы в действительности с тою же абсолютной скоростью, с которой корабль идет относительно Земли. Если же и сама Земля движется, то истинное абсолютное движение тела найдется по истинному движению Земли в неподвижном пространстве и по относительным движениям корабля по отношению к Земле и тела по кораблю.

. . . . . »

Наконец, приведем

*«АКСИОМЫ ИЛИ ЗАКОНЫ ДВИЖЕНИЯ*

Закон I

*Всякое тело продолжает удерживаться в своем состоянии покоя или равномерного и прямолинейного движения, пока и поскольку оно не понуждается приложенными силами изменять это состояние.*

. . . . . .

Закон II

*Изменение количества движения пропорционально приложенной движущей силе и происходит по направлению той прямой, по которой эта сила, действует.*

Если какая-нибудь сила производит некоторое количество движения, то двойная сила произведет двойное, тройная — тройное, будут ли они

приложены разом все вместе, или же последовательно и постепенно. Это количество движения, которое всегда происходит по тому же направлению, как и производящая его сила, если тело уже находилось в движении, при совпадении направлений прилагается к количеству движения тела, бывшему ранее, при противоположности — вычитается, при наклонности — прилагается наклонно и соединяется с бывшим ранее, сообразно величине и направлению каждого из них.

Закон III

*Действию всегда есть равное и противоположное противодействие, иначе — взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны.*

. . . . . »

Как видно уже из сказанного и, конечно, с еще большей ясностью из всего текста «Начал», они четко построены в духе классического образца — «Начал геометрии» Евклида. Такой стиль вообще характерен для Ньютона, причем сформировался он задолго до «Начал». Например, так же построены «Лекции по оптике», которые Ньютон читал в 1669—1671 гг., хотя они и были впервые опубликованы лишь после смерти Ньютона [16]. Конечно, подражание форме «Начал» Евклида — это не столько стиль Ньютона, сколько стиль эпохи.

Набранные выше курсивом (разумеется, в согласии с [1]) части законов I, II, III (в случае законов I и III пояснения опущены) — это и есть те три знаменитых «закона Ньютона», которые часто цитируются и до сих пор (см., например, [2]) *). Последнее, по крайней мере в общем курсе физики, представляется оправданным. Впрочем, законы Ньютона в их оригинальной форте приведены и в курсе теоретической физики Зоммерфельда [17]. Разумеется, использовать эти законы без пояснений и комментариев сейчас невозможно, об этом речь пойдет в следующем разделе настоящей статьи.

Книга I «Начал» посвящена в основном решению задач о движении тел («точечных» масс) под действием центральных сил (и при отсутствии сопротивления). Главное здесь — анализ движения под действием силы, обратно пропорциональной квадрату расстояния ($F \backsim 1/r^2$). При этом доказываются законы Кеплера и, наоборот, делается вывод, что для движения, отвечающего этим законам, сила $F \backsim 1/r^2$ (достаточно, впрочем, первого закона — движения по эллипсу, в фокусе которого находится источник силы). Именно этот вопрос, как упоминалось, перед Ньютоном поставил Гадлей. Рассматривается движение не только по эллипсам, но и по параболам и гиперболам, т. е. по любым коническим сечениям. Обсуждается и задача трех и большего числа тел, заложены основы теории возмущений. Одно из достижений книги I — доказательство (нелегкое и полученное впервые) такой теоремы: для закона притяжения $F \backsim 1/r^2$ действие сферы (при постоянной плотности массы или при сферически симметричном распределении плотности) такое же, как если бы вся масса была расположена в центре сферы («частица, находящаяся вне сферической поверхности, притягивается к центру сферы с силой, обратно пропорциональной квадрату ее расстояния до центра сферы» [1], с. 245). Разумеется, при исследовании теоремы Гаусса (1777—1855) соответствующее доказательство достаточно очевидно. Всего, конечно, здесь не перескажешь (несколько подробнее это сделано в [7]). Ограничимся еще упоминанием, что в книге III содержится теория движения Луны с учетом действия не только Земли, но и Солнца (эта теория

*) В большой физической аудитории физфака МГУ, да и, вероятно, во многих других аудиториях во всем мире, оригинальная (латинская) формулировка этих законов украшала одну из стен.

не может считаться полной, но поражает своей мощью, учитывая использовавшиеся методы). Развил здесь Ньютон и теорию приливов и рассмотрел движения комет. Только благодаря Ньютону удалось выяснить, впервые на примере кометы Галлея (наблюдавшейся, в частности, в 1682 г.), что кометы движутся по эллиптическим (в первом приближении) орбитам и поэтому «возвращаются» [18,19,39].

Помимо подобных конкретных, причем, как иногда говорят, «сильных» результатов, очень важны понимание универсальности тяготения и формулировка закона всемирного тяготения. Свое третье «правило умозаключений в физике» — на этих правилах мы еще остановимся ниже — Ньютон сопровождает таким замечанием:

«Наконец, как опытами, так и астрономическими наблюдениями устанавливается, что все тела по соседству с Землею тяготеют к Земле, и притом пропорционально количеству материи каждого из них; так, Луна тяготеет к Земле пропорционально своей массе, и взаимно наши моря тяготеют к Луне, все планеты тяготеют друг к другу; подобно этому и тяготение комет к Солнцу. На основании этого правила надо утверждать, что все тела тяготеют друг к другу. Вообще тяготение подтверждается явлениями даже сильнее, нежели непроницаемость тел, для которой по отношению к телам небесным мы не имеем никакого опыта и никакого наблюдения» ([1], с. 504).

В современных обозначениях закон всемирного тяготения Ньютона можно записать так: любые два тела (материальные точки) с массами $m_i$ и $m_j$ притягиваются друг к другу с силами $F_{ij}$, пропорциональными произведению масс $m_i \cdot m_j$ и обратно пропорциональными квадрату расстояния между телами $r_{ij}$; при этом сила притяжения направлена по линии, соединяющей тела (материальные точки). Таким образом, сила, действующая на массу $m_i$ со стороны массы $m_j$,

$$\mathbf{F}_{ij}(r_{ij}) = \frac{Gm_i m_j}{r_{ij}^3}\mathbf{r}_{ij}, \quad \mathbf{F}_{ji}(r_{ij}) = -\mathbf{F}_{ij}(r_{ij}), \tag{1}$$

где гравитационная постоянная $G = 6{,}67 \cdot 10^{-8}$ дин·см$^2$г$^{-2}$ не зависит от масс взаимодействующих тел, т. е. является универсальной; вектор $\mathbf{r}_{ij}$ соединяет точки $i$ и $j$, причем направлен от точки $i$ к точке $j$ (очевидно, $r_{ij} = r_{ji} =$

Постоянная $G$ опытами на Земле впервые была измерена в 1798 г. Кавендишем (1731—1810). Постоянная Кеплера $K$, упомянутая выше в связи с третьим законом Кеплера, равна

$$K \equiv \frac{a^3}{T^2} = \frac{GM_\odot}{4\pi^2},$$

где $M_\odot = 1{,}99 \cdot 10^{33}$ г — масса Солнца. Если не пренебрегать массой планет по сравнению с массой Солнца, то, разумеется, нужно учитывать и движение последнего относительно общего для всей планетной системы центра тяжести (центра масс). Третий закон Кеплера при этом изменяется и в применении к задаче двух тел принимает вид (см., например, [2], § 59)

$$\frac{a^3}{T^2(M_\odot + m)} = \frac{G}{4\pi^2},$$

где $m$ — масса планеты. Масса всех планет солнечной системы в 743 раза меньше массы Солнца, масса Земли $M_\oplus \equiv M_З = 5{,}98 \cdot 10^{27}$ г $= 3 \cdot 10^{-6}\, M_\odot$, масса Юпитера $M_Ю = 318\, M_З \approx 10^{-3}\, M_\odot$. Поэтому в первом приближении Солнце можно считать неподвижным. Если бы массы планет были значительно больше и, скажем, всего на порядок меньше массы Солнца, понимание законов движения в Солнечной системе и вывод закона всемирного тяготения могли бы произойти значительно позже, чем в действительности. Теория движения Луны сложна, в частности, в связи с тем, что ее масса $M_Л = 7{,}35 \cdot 10^{25}$ г всего в 81,3 раза меньше массы Земли. Мы напоминаем эти

хорошо известные обстоятельства лишь для того, чтобы подчеркнуть понимание их Ньютоном.

Даже беглая характеристика «Начал» и их роли не может, однако,, быть сведена к перечислению конкретных результатов и теорий, установленных Ньютоном. Существенное место занимает его подход к физике, используемой им метод, часто называемый методом принципов. Остановимся на этом вопросе.

## «НАЧАЛА» И МЕТОД ПРИНЦИПОВ. ПРИРОДА ТЯГОТЕНИЯ

В книге III «Начал» Ньютон формулирует свою, так сказать, методологию или метод принципов, раньше всего в форме «Правил умозаключений в физике» ([1], с. 502).

### *«ПРАВИЛА УМОЗАКЛЮЧЕНИЙ В ФИЗИКЕ*

#### Правило I

*Не должно принимать в природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений.*

По этому поводу философы утверждают, что природа ничего не делает напрасно, а было бы напрасным совершать многим то, что может быть сделано меньшим. Природа проста и не роскошествует излишними причинами вещей.

#### Правило II

*Поэтому, поскольку возможно, должно приписывать те же причины того же рода проявлениям природы.*

Так, например, дыханию людей и животных, падению камней в Европе и в Африке, свету кухонного очага и Солнца, отражению света на Земле и на планетах.

#### Правило III

*Такие свойства тел, которые не могут быть ни усиляемы, ни ослабляемы и которые оказываются присущими всем телам, над которыми возможно производить испытания, должны быть почитаемы за свойства всех тел вообще».*

Правило III сопровождается пояснением, часть которого, касающаяся всемирного тяготения, уже цитировалась выше. Далее следует

#### «Правило IV

*В опытной физике предложения, выведенные из совершающихся явлений с помощью наведения (индукции), несмотря на возможность противных им предположений, должны быть почитаемы за верные или в точности, или приближенно, пока не обнаружатся такие явления, которыми они еще более уточняются или же окажутся подверженными исключениям.*

Так должно поступать, чтобы доводы наведения не уничтожались предположениями».

Какова направленность «правил умозаключений», какова их цель? Ответить на эти вопросы можно лишь в свете того мировоззрения и той методологии, которые доминировали до Ньютона, с которыми он боролся. Речь идет, в частности, о картезианских представлениях о природе и путях ее изучения. В основе лежали не наблюдения или опыты, а гипотезы о природе явлений, их причинах. Так, тяготение связывалось с вихрями в некой «тонкой материи» и целиком трактовалось в духе близкодействия. Но на таком

пути продвинуться вперед и создать количественную теорию было совершенно невозможно, особенно в те времена. Упрощая и схематизируя, можно сказать, что программа Декарта, его сторонников и последователей сводилась к построению теории гравитационного поля или, конкретно, общей теории относительности, до создания механики и теории всемирного тяготения Ньютона. Огромная заслуга последнего состояла, в частности, именно в понимании реальных возможностей физики его времени, и, в этой связи, в использовании упомянутых правил, и, если говорить о тяготении, в постулировании закона всемирного тяготения с его дальнодействием.

«Общее поучение», которым заканчиваются «Начала», в значительной части посвящено борьбе с гипотезой вихрей, «которые подавляются многими трудностями». Здесь упоминаются, в частности, наблюдения над движением планет и комет: «Движения комет вполне правильны и следуют тем же законам, как и движения планет, и не могут быть объяснены вихрями. Кометы переносятся по весьма эксцентрическим орбитам во всех областях неба, чего быть не может, если только вихрей не уничтожить» ([1], с. 658). Полемике с противниками и критиками Ньютона посвящено также весьма обширное «Предисловие издателя ко второму изданию» (1713 г.), написанное Р. Котсом по предложению Ньютона. Если Ньютон, по крайней мере в «Началах», в общем не опускался до полемических выпадов, то Коте, защищая ньютонианство и критикуя противников, не стесняется в выражениях. Например, он пишет ([1], с. 12):

«Так как все тела, находящиеся на Земле или в небесных пространствах, относительно которых возможно поставить или опыты, или наблюдения, тяготеют взаимно, то можно утверждать, что тяготение есть общее свойство всех тел. Подобно тому как нельзя представить себе тело, которое бы не было протяженным, подвижным и непроницаемым, так нельзя себе представить и тело, которое бы не было тяготеющим, т. е. тяжелым.

Если кто станет утверждать, что тела, составляющие неподвижные звезды,— не тяготеющие, ибо их тяготение не было наблюдаемо, то, рассуждая так же, следовало бы сказать, что эти тела и не протяженны и что они не обладают ни подвижностью, ни непроницаемостью, ибо и эти свойства для неподвижных звезд никем наблюдаемы не были. Что же из этого следует? Или что в числе общих свойств тел находится и тяготение, или же что протяженность, подвижность и непроницаемость также не находятся в их числе, и следовательно, или что природа вещей правильно объясняется тяготением тел, или же что она неправильно объясняется и протяженностью, л подвижностью, и непроницаемостью.

Я слышу, как некоторые осуждают это заключение и неведомо что бормочут о скрытых свойствах. Они постоянно твердят, что тяготение есть скрытое, сокровенное свойство, скрытым же свойствам не место в философии. На это легко ответить: сокровенны не те причины, коих существование обнаруживается наблюдениями с полнейшей ясностью, а лишь те, самое существование которых неизвестно и ничем не подтверждается.

Следовательно, тяготение не есть скрытая причина движения небесных тел, ибо явления показывают, что эта причина существует на самом деле. Правильнее признать, что к скрытым причинам прибегают те, кто законы этих движений приписывает неведомо каким вихрям некоторой чисто воображаемой материи, совершенно непостижимой чувствами.

Но, может быть, тяготение следует признать скрытой причиной и исключить из философии потому, что причина самого тяготения неизвестна и никем не найдена. Кто рассуждает таким образом, должен озаботиться, чтобы не впасть в такое противоречие, которое рушит основания всей философии. Причины идут неразрывной цепью от сложнейших к простейшим, и когда достигнута самая простая причина, то далее идти некуда. Поэтому простейшей причине нельзя дать механического объяснения, ибо если бы таковое существовало, то эта причина не была бы простейшею. Поэтому если про-

стейшие причины называть сокровенными и исключать, то придется исключать и непосредственно от них зависящие, затем и происходящие от этих последних, пока философия не окажется свободной и очищенной от всяких причин вообще.

Есть и такое учение, в котором утверждают, что тяготение сверхъестественно, и называют его непрерывным чудом, и поэтому считают, что его надо отбросить, ибо в физике не место сверхестественному. Едва ли стоит затрачивать труд, чтобы опровергнуть такую нелепость, которая низвергает всякую философию вообще. По такому учению придется или отрицать, что тяготение присуще телам, чего, однако, утверждать нельзя, или же придется называть это свойство тел сверхъестественным, ибо его нельзя вывести ни из других их свойств, ни из механических причин.

Но непременно должны существовать некоторые первоначальные свойства тел и, следовательно, как таковые, не вытекающие из других. Значит, и все такие свойства пришлось бы считать сверхъестественными и отбросить; спрашивается, какая же после этого останется философия.

Некоторым вся эта небесная физика еще менее нравится, ибо она противоречит *декартовым* догматам и едва ли может быть с ними согласована. Пусть они остаются при своем мнении, но пусть они будут справедливы и предоставят другим такую же свободу, какую они желают, чтобы была предоставлена им. Пусть же нам будет предоставлено право придерживаться *ньютоновской* философии, которую мы считаем более правильной, и признавать истинными причины, подтверждаемые явлениями, а не такие, которые выдумываются и ничем не подтверждаются».

Несколько далее Коте еще более резок:

«Мы не допускаем возможности объяснить совершающиеся явления вихрями, потому что это нашим автором доказано с совершеннейшею ясностью и полнотою, и надо обладать большой склонностью к бредням, чтобы напрасно затрачивать труд на подновление нелепейшей выдумки и на украшение ее новыми пояснениями».

Только путь, на который встал Ньютон, его дальнодействующая теория всемирного тяготения привели к успеху, к развитию механики и астрономии. Характерно в этом отношении замечание, сделанное Эйнштейном в «Автобиографических заметках», написанных на 68-м году жизни и представлявших собой «что-то вроде собственного некролога». Обсуждая механику Ньютона и ее слабые стороны, Эйнштейн восклицает:

«Прости меня, Ньютон; ты нашел единственный путь, возможный в твое время для человека величайшей научной творческой способности и силы мысли. Понятия, созданные тобой, и сейчас еще остаются ведущими в нашем физическом мышлении, хотя мы теперь и знаем, что если мы стремимся к более глубокому пониманию взаимосвязей, то мы должны будем заменить эти понятия другими, стоящими дальше от сферы непосредственного опыта» ([14], с. 270).

Ньютон, в отличие от некоторых его последователей, вовсе не считал при этом, что сформулированный им закон всемирного тяготения исчерпывает проблему и выяснение природы тяготения не нужно. Напротив, он признавал, что доискиваться до причин нужно, но при наличии достаточно прочной базы, в первую очередь наблюдений. Об этом свидетельствует, в частности, окончание последнего «общего поучения», которым заканчиваются «Начала» ([1], с. 661):

«До сих пор я изъяснял небесные явления и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я не указывал причины самого тяготения. Эта сила происходит от некоторой причины, которая проникает до центра Солнца и планет без уменьшения своей способности и которая действует не пропорционально величине *поверхности* частиц, на которые она действует (как это обыкновенно имеет место для механических причин), но пропорционально количеству *твердого* вещества, причем ее действие распростра-

няется повсюду на огромные расстояния, убывая пропорционально квадратам расстояний. Тяготение к Солнцу составляется из тяготения к отдельным частицам его и при удалении от Солнца убывает в точности пропорционально квадратам расстояний даже до орбиты Сатурна, что следует из покоя афелиев планет, и даже до крайних афелиев комет, если только эти афелии находятся в покое. Причину этих же 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.

В такой философии предложения выводятся из явлений и обобщаются помощию наведения (индукции). Так были изучены непроницаемость, подвижность и напор тела, законы движения и тяготение. Довольно того, что тяготение на самом деле существует и действует согласно изложенным нами законам и вполне достаточно для объяснения всех движений небесных тел и моря.

Теперь следовало бы кое-что добавить о некотором тончайшем эфире, проникающем во все сплошные тела и в них содержащемся, коего силою и действиями частицы тел при весьма малых расстояниях взаимно притягиваются, а при сопрокосновении сцепляются, наэлектризованные тела действуют на большие расстояния, как отталкивая, так и притягивая близкие малые тела, свет испускается, отражается, преломляется, уклоняется и нагревает тела,, возбуждается всякое чувствование, заставляющее члены животных двигаться по желанию, передаваясь именно колебаниями этого эфира от внешних органов чувств мозгу и от мозга мускулам. Но это не может быть изложено вкратце, к тому же нет и достаточного запаса опытов, коими законы действия этого эфира были бы точно определены и показаны».

Еще ярче, возможно, Ньютон высказался против дальнодействия в письме к Р. Бентли, написанном в 1693 г.:

«Предполагать, что тяготение является существенным, неразрывным ж врожденным свойством материи, так что тело может действовать на другое на любом расстоянии в пустом пространстве, без посредства чего-либо передавая действие и силу,— это, по-моему, такой абсурд, который немыслим ни для кого, умеющего достаточно разбираться в философских предмет Тяготение должно вызываться агентом, постоянно действующим по определенным законам» (цитируется согласно [6], с. 147; о переписке Ньютона с Бентли см., в частности, [40]).

Приведенные выше слова Ньютона «гипотез я не измышляю» особенна часто цитировались (при этом стало нормой приводить их и по-латыни: hypotheses поп fingo), но, как ясно из всего изложенного, это утверждение нужна понимать не как отрицание роли и необходимости гипотез, а в духе противопоставления методов Ньютона необоснованным спекуляциям. Более того, если говорить о гипотезах в тех смыслах, которые обычно вкладываются в термин «гипотеза» в современных научных исследованиях, то Ньютон «был одним из величайших гигантов среди не столь уж многочисленного отряда изобретателей гипотез. Но он действительно не измышлял гипотез (т. е. безосновательных спекуляций и непроверяемых мнений)» ([9], с. 127).

## КРИТИКА МЕХАНИКИ НЬЮТОНА И ЕЕ ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

Ньютон построил, несомненно, стройное в целом здание классической механики. Однако в «Началах» имеются слабые места, не говоря уже о том, что в механике предстояло сделать еще очень многое.

Остановимся сначала на критических замечаниях. Волею судеб неудовлетворительным, и не без оснований, было признано уже определение I, открывающее «Начала», а именно определение массы (см. выше). На этот счет существует целая литература [20,38]. Зоммерфельд, например, называет это определение «бессодержательным, так как плотность в свою очередь может

быть определена только как количество материи в единице объема» ([17], с. 8). Формально такая критика обоснована, фактически же приведенное выше пояснение Ньютона к определению I многое разъясняет; особенно важно, что масса тела пропорциональна его весу. В общем, насколько нам известно, ни к каким ошибкам или даже особым неясностям принятое Ньютоном определение массы его не привело. Действительно, согласно определению II импульс тела (его «количество движения») $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$. Далее, второй и третий законы Ньютона приводят к заключению, что при взаимодействии двух тел, изолированных от их окружения, суммарный импульс $m_1\mathbf{v}_1 + m_2\mathbf{v}_2$ сохраняется. Поэтому отношение масс $m_1/m_2 = -\Delta v_2/\Delta v_1$ можно измерить, определяя изменения скоростей тел в результате их взаимодействия, скажем, при ударе. Именно такое определение величины массы, в сочетании с выбором какой-то массы («эталонной гири») за единицу, сейчас широко распространено*). Близкое определение величины массы, особенно детально обсуждавшееся Э. Махом (1838—1916), оперирует не с изменениями скоростей $\Delta\mathbf{v}_1$ и $\Delta\mathbf{v}_2$, а с ускорениями тех же масс $\mathbf{a}_1$ и $\mathbf{a}_2$ (подробнее см. [20]). Поскольку все здесь основано на законах Ньютона, не приходится удивляться, что принятое им и с основаниями критикуемое определение массы не привело к отрицательным последствиям.

Заметим, что мы говорили выше об определении или измерении «величины массы», а не об определении самого понятия массы. Масса — это некоторая мера инертности тела, она фигурирует в выражении для импульса $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ и во втором законе Ньютона (очевидно, речь идет об инертной массе, вопроса о «тяжелой массе» сейчас не касаемся). Как измерять массу $m$, указано выше (подробнее см. [2,20,38]). Но неверно было бы сказать, как это нередко делается в литературе, что масса (или, точнее, отношение масс) есть не что иное, как отношение соответствующих ускорений или отношение изменения скоростей.

Неудачным представляется ньютоновское определение III, в котором Ньютон фактически именует произведение массы на ускорение $m\mathbf{a}$ «силой инерции» ([1], с. 25). Злополучное понятие о силах инерции вызвало многочисленные споры, отзвуки которых можно услышать и в наши дни (см., например, [21–23,35]). Здесь нет, конечно, возможности останавливаться на этом вопросе подробнее. Ограничимся замечанием, что, по нашему мнению, совпадающему с наиболее распространенным, понятие и термин «сила инерции» уместно и целесообразно использовать лишь в неинерциальных системах отсчета. Если ускорение такой системы относительно инерциальной системы отсчета есть $\mathbf{a}_0$, то второй закон Ньютона в неинерциальной системе принимает такой же вид, как в инерциальной системе (см., в частности, ниже), но с добавлением в правую часть уравнения движения для массы $m$ «силы инерции»

$$\mathbf{F}_{\text{и}} = -m\,(\mathbf{a}_{\text{пер}} + \mathbf{a}_{\text{кор}}),$$

где $\mathbf{a}_{\text{пер}} = \dot{\mathbf{v}}_0 + [\dot{\boldsymbol{\omega}}\mathbf{r}] + [\boldsymbol{\omega}[\boldsymbol{\omega}\mathbf{r}]]$ — ускорение переносного движения и $\mathbf{a}_{\text{кор}} = 2\,[\boldsymbol{\omega}\mathbf{v}_{\text{отн}}]$ — кориолисово ускорение (подробнее и в тех же обозначениях см. [2], § 64; нам представляется нецелесообразным расшифровывать все эти хорошо известные выражения). Когда речь идет об основах механики и ее принципах, не только достаточно, но и представляется наиболее рациональным ограничиться рассмотрением инерциальных систем отсчета. Переход к другим системам отсчета практически бывает весьма важным, но представляет собой лишь кинематический пересчет.

---

*) В частности, так величина массы определяется в курсе[2]. Автор часто ссылается на этот курс, ибо речь идет об учебном пособии, «допущенном» и фактически используемом в настоящее время на физических факультетах в наших вузах. Приятно констатировать, что этот учебник находится, по нашему мнению, на должной высоте (сейчас, правда, мы касаемся только основ механики).

Теперь мы подошли к вопросу уже принципиальному — выбору систем отсчета, в которых справедливы законы Ньютона в сформулированной им форме. Ньютон ясно понимал, конечно, что выбор системы отсчета и указание способа измерения (определения) времени совершенно необходимы для изучения движения масс. Например, если даже понимать первый закон буквально и считать, что некое тело движется в данной системе отсчета по инерции — равномерно и прямолинейно, то в других системах отсчета движение тела будет, вообще говоря, неравномерным и непрямолинейным (исключение составляют, как известно, системы отсчета, имеющие постоянную скорость V = const относительно исходной). Поэтому Ньютон и ввел понятия об абсолютном пространстве и абсолютном времени, при использовании которых справедливы законы движения. Ньютон понимал, вместе с тем, что не может указать способа фиксировать абсолютное положение и абсолютное время — это вполне очевидно из текста «Начал» и. например, из такого отрывка, где речь идет об абсолютном пространстве ([1], с. 32):

«Однако совершенно невозможно ни видеть, ни как-нибудь иначе различить при помощи наших чувств отдельные части этого пространства одну от другой, и вместо них приходится обращаться к измерениям, доступным чувствам. По положениям и расстояниям предметов от какого-либо тела, принимаемого за неподвижное, определяем места вообще, затем и о всех движениях судим по отношению к этим местам, рассматривая тела лишь как переносящиеся по ним. Таким образом вместо абсолютных мест и движений пользуются относительными; в делах житейских это не представляет неудобства, в философских необходимо отвлечение от чувств. Может оказаться, что в действительности не существует покоящегося тела, к которому можно было бы относить места и движения прочих».

Для нас сегодня метафизический характер абсолютного пространства и абсолютного времени очевиден. Но 300 лет назад царила иная атмосфера и доминировали другие понятия, чем теперь. Ньютон должен был и, вероятно, хотел видеть за «относительным», «кажущимся» и «обыденным» нечто абсолютное, существующее независимо от возможностей измерений и наблюдений. Такой подход оказался возможным и плодотворным потому, что фактически Ньютон выбирал системы отсчета, очень близкие к инерциальным. Именно такова в первую очередь принятая в астрономии система с центром в центре Солнца (или центре масс Солнечной системы) и с осями, направленными на «неподвижные звезды». Для многих опытов на земной поверхности близкой к инерциальной системе является сама эта поверхность и ее окрестности. Абсолютное пространство Ньютона «материализовалось» в теориях, исходивших из представлений о неподвижном эфире. Только общая теория относительности, творение начала нашего века, окончательно вытеснила из физики абсолютное пространство и абсолютное время, понимаемые как абсолютно неизменные и, так сказать, внешние по отношению к веществу и всем полям. Но еще задолго до этого, в XVIII и XIX веках, ньютоновские представления об абсолютном пространстве и времени подверглись жестокой критике и, главное, было развито представление об инерциальных системах отсчета, в которых и справедливы законы Ньютона. Отсылая за некоторыми подробностями к книгам и статьям [12,24–27,35–37] и цитируемой там литературе, мы считаем целесообразным кратко остановиться здесь на современной форме изложения основ механики Ньютона.

Из опыта известно, что существуют такие системы отсчета и такие часы (основанные на наблюдении различных периодических процессов, например вращения Земли или колебаний маятника), при использовании которых тело (масса), достаточно удаленная от всех других, движется прямолинейно и равномерно. Такое утверждение можно, собственно, считать первым законом динамики. Возможно, Ньютон нечто подобное и имел в виду. Известно и другое объяснение причины, по которой Ньютон выделил первый закон. Именно, он мог стремиться подчеркнуть, что при отсутствии сил тело не только оста-

ется в покое, но и может двигаться с постоянной скоростью (это обстоятельство до Ньютона оставалось, по-видимому, недостаточно ясным). Так или иначе, выделение и формулировка первого закона (закона инерции) дают основания для некоторого недоумения и критики. Действительно, если считать силы известными, то первый закон является прямым следствием второго — при отсутствии сил количество движения $m\mathbf{v} = \text{const}$, а значит, по крайней мере при $m = \text{const}$, и скорость $\mathbf{v} = \text{const}$. С другой стороны, как узнать, что на тело не действует сила? Если используется инерциональная система отсчета, то отсутствие сил устанавливается сразу — в этом случае масса движется по инерции, т. е. $\mathbf{v} = \text{const}$. Но, чтобы избежать порочного круга, нельзя обратить постановку задачи и считать без дальнейших ограничений инерциальными системы отсчета, в которых массы движутся с постоянной скоростью. Поэтому выше, как. это часто делается, при определении инерциальной системы было использовано следующее из наблюдений свойство — убывание сил с расстоянием. Более последовательна такая процедура — остановимся на ней для конкретности и краткости на примере Солнечной системы. В «астрономической системе отсчета» (с началом координат в центре масс Солнечной системы и с осями, направленными на неподвижные звезды) силы между всеми массами (планетами, их спутниками) подчиняются третьему закону Ньютона, т.е. в уже использованных выше обозначениях для каждых двух масс $m_i$ и $m_j$

$$\mathbf{F}_{ij}(r_{ij}) = -\mathbf{F}_{ji}(r_{ij}). \tag{2}$$

В данном случае речь идет о силах гравитации (1). Однако, как известно, закон (2) справедлив в значительно более широкой области (для электростатических сил, в макроскопической механике — при рассмотрении пружин, анализе соударений тел и т. д.).

Очевидно, в условиях справедливости соотношений (1) и (2), масса, достаточно удаленная от всех других масс, будет двигаться по инерции. Следовательно, с соответствующей точностью астрономическая система отсчета является инерциальной. В этой системе справедлив второй закон Ньютона в форме

$$m_i \frac{d^2\mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_j \mathbf{F}_{ij}(r_{ij}), \tag{3}$$

где $m_i$ — радиус-вектор для массы $i$ $(r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|)$. Уравнение (3) инвариантно относительно преобразований Галилея

$$\mathbf{r}_i' = \mathbf{r}_i - \mathbf{V}t, \quad t' = t, \quad \mathbf{V} = \text{const}. \tag{4}$$

Тем самым ясно, что имеется бесконечно большое число инерциальных систем, движущихся с постоянной скоростью V относительно исходной — в нашем случае астрономической системы отсчета.

Но, разумеется, совершенно не обязательно использовать в качестве исходной инерциальной системы астрономическую систему отсчета. Это особенно естественно лишь в вопросах небесной механики. Инерциальной является, как известно, любая система, свободно и без вращения падающая (движущаяся) в достаточно однородном гравитационном поле (свободно падающий «лифт», космический корабль с выключенными двигателями). При этом, конечно, предполагается, что негравитационные силы отсутствуют или, лучше сказать, не играют роли (подробнее, с оценкой «степени инерциальности» тех или иных систем отсчета, эти вопросы обсуждаются в[35,36]). Близким, по сути дела, является определение инерциальной системы как такой, в которой пространство можно считать однородным и изотропным, а время — однородным (речь, таким образом, идет о пространстве-времени Минковского; см. [3], § 3 и[37]). В общем, вопрос об инерциальных системах отсчета в классической механике в наше время может считаться вполне ясным.

Если силы $\mathbf{F}_{ij}$ известны или заданы (и, конечно, только в этих случаях) уравнения движения (3) содержательны и позволяют, в принципе, найти траектории всех «точечных» масс $\mathbf{r}_i(t)$. Опустим здесь тривиальные замечания, касающиеся необходимости задавать начальные условия или возможности использовать любые системы отсчета, переход к которым фиксирован соответствующими преобразованиями координат. Очевиден также, по крайней мере в принципе, переход к более сложным механическим системам (твердое тело, различные механизмы и т. д.).

Итак, основы классической механики вполне определенны и ясны. Уточнения, по сравнению с «Началами», в общем существенны, но преимущественно в логическом плане и ни в коей мере не меняют оценку роли «Начал», не поколебали их основополагающего значения. Практика Ньютона при исследованиях в области механики была в целом правильной, предусмотреть же все возможные уточнения и обобщения он, конечно, не мог.

Широко распространено такое дилетанское мнение (автор должен признатья, что и он его придерживался). Поскольку Ньютон «изобрел» анализ (дифференцирование и интегрирование) или, во всяком случае, владел его основами и был одним из главных пионеров в этой области, то и в «Началах» он пользовался анализом. Разумеется, подобное заключение обусловлено тем фактом, что сегодня немыслимо представить себе решение задач механики без интегрирования дифференциальных уравнений движения (3). Фактически же Ньютон в «Началах» анализ в явном виде вообще не использовал (!). Все «Начала» построены, если говорить о математике, на геометрических методах и чертежах. Вместе с тем тот факт, что ко времени создания «Начал» Ньютон уже владел элементами анализа, глубоко отразился, по-видимому, на его работе, только он и позволил получить некоторые результаты. В «поучении», помещенном в книге II «Начал», Ньютон упоминает о том, что владеет рядом математических методов, ранее неизвестных (см. [1], с. 334). Вполне возможно, что Ньютон не использовал анализ в явном виде для доступности изложения, ибо читателям анализ был еще неизвестен (Ньютон свои математические работы до издания «Начал» не публиковал; первая публикация Лейбница (1646—1716), касающаяся анализа, относится к 1684 г.). Существует и несколько иная точка зрения (см., в частности, очень содержательную брошюру [7]), а именно: Ньютон и не мог сколько-нибудь широко использовать аналитические методы, ибо они не были еще созданы. Только Эйлер (1707—1783) в 1736 г., т. е. через 50 лет после появления «Начал», написал книгу «Механика, аналитически изложенная», содержащую близкие к современным аналитические методы. Дальнейшие успехи в этом направлении связаны с именами Клеро (1713—1765), Даламбера (1717—1783), Лагранжа (1736—1813) и Лапласа (1749—1827). Все они занимались небесной механикой, повторяли выводы Ньютона другими методами, уточняли расчеты движения Луны, планет и их спутников. При этом, когда возникали затруднения или, попросту говоря, расхождения при сравнении расчетов с наблюдениями, начинали сомневаться в справедливости закона $F \propto 1/r^2$ для силы всемирного тяготения. Последнее естественно, ведь этот закон не был «выведен» или обоснован на базе какой-то модели. Но с уточнением расчетов расхождения исчезали. Казалось, что Лаплас в его пятитомной «Небесной механике» *) завершил здание ньютоновской теории движений в Солнечной системе. В каком-то смысле это действительно верно, хотя развитие небесной механики продолжается и сегодня, особенно оно было стимулировано запуском искусственных спутников Земли и различных космических зондов (включая, конечно, запуски аппаратов, исследовавших в 1986 г. комету Галлея). Но если иметь в виду выход за пределы механики Ньютона, то это историческое событие произошло, хотя тогда и не было осознано, лишь в 1859 г.

*) Издание было завершено в 1825 г.; кстати, само название «Небесная механика» было введено именно Лапласом в 1798 г. [28].

Мы имеем в виду обнаруженную Леверье (1811—1877) аномалию в движении Меркурия. А именно: даже при учете всех известных возмущений от других планет перигелий Меркурия, согласно расчетам Леверье, по неизвестным причинам дополнительно поворачивается на 38 угловых секунд (″) в столетие. По уточненным в 1882 г. данным поворот перигелия Меркурия равен 43″/столетие. С учетом лучших известных значений для скорости света и астрономической единицы, поворот перигелия по упоминаемой ниже формуле Эйнштейна составляет 42,98″/столетие[41]. Это значение согласуется с наблюдениями с точностью около $\pm 0,1$ ″/столетие. Аномальный поворот перигелия пытались объяснить различными причинами — возмущением от неизвестной планеты или кольца астероидов, сплющенностью Солнца, отклонениями от закона всемирного тяготения $F \sim 1/r^2$ и т. д. Вопрос оставался, однако, совершенно открытым вплоть до 1915 г., когда Эйнштейн показал ([29], с. 439), что общая теория относительности, построение которой как раз тогда завершалось, без всяких дополнительных предположений приводит к релятивистскому повороту перигелиев планет, причем: «Вычисление дает для планеты Меркурий поворот на 43" в столетие, тогда как астрономы указывают 45" ± 5 в качестве необъяснимой разницы между наблюдениями и теорией Ньютона. Это означает полное согласие с наблюдениями» ([29], с. 446—447). Если бы Эйнштейн использовал уже известные тогда более точные данные наблюдений (поворот на 43"), совпадение с теорией было бы еще лучшим. Однако и без этого имело место подлинное торжество общей теории относительности. Та обычная для научной литературы довольно сухая фраза из статьи Эйнштейна, которая выше процитирована, не отражает, естественно, чувств ее автора. По мнению А. Пайса, написавшего лучшую из известных нам биографию Эйнштейна[30], объяснение поворота перигелия Меркурия явилось «самым сильным эмоциональным событием за всю научную жизнь Эйнштейна, а быть может, за всю его жизнь». (Эйнштейн по этому поводу писал: «В течение нескольких дней я был вне себя от радостного возбуждения»[30], с. 253.)

Если не говорить о таком облачке на далеком горизонте, как аномалия в движении Меркурия, в XIX веке ньютоновская механика торжествовала. К ней пытались свести, объяснить на ее основе и электромагнитные явления. Как мы хорошо знаем сегодня, абсолютизация классической или ньютоновской механики (как, впрочем, и любая иная абсолютизация) не обоснована, если угодно, просто неверна.

Точность результатов классической механики ограничена при учете зависимости массы $m$ от ее скорости $v$ (частная теория относительности, 1905 г.) и в связи с требованием слабости ньютоновского гравитационного потенциала $\varphi$ по сравнению с квадратом скорости света $c^2$ (общая теория относительности, 1915 г.). В применении к Солнечной системе (вряд ли здесь уместны уточнения и Цояснения) оба эти требования можно свести к одному:

$$\frac{v^2}{c^2} \sim \frac{|\varphi|}{c^2} \ll 1 \qquad (5)$$

(при движении по кругу для силы всемирного тяготения, как хорошо известно, $v^2 = |\varphi| = GM/r$). На поверхности Солнца $|\varphi_\odot|/c^2 = 2{,}12 \cdot 10^{-6}$ ($M_\odot = 1{,}99 \cdot 10^{33}$ г, $r_\odot = 6{,}96 \cdot 10^{10}$ см), на орбите Земли $v^2/c^2 \approx |\varphi|/c^2 \approx 10^{-8}$ ($v \approx 3 \cdot 10^6$ см/с), для близких спутников Земли и на ее поверхности $v^2/c^2 \approx |\varphi|/c^2 = 7 \cdot 10^{-10}$ ($v \approx 8 \cdot 10^5$ см/с). Таким образом, эффекты теории относительности в пределах солнечной системы весьма малы (условия (5) выполняются с большим запасом) и, кстати сказать, в пределах достигнутой точности полностью подтверждаются наблюдениями[31,32]. Для микрочастиц (электронов, протонов и т. д.) гравитационное взаимодействие пренебрежимо мало и достигается скорость $v$, весьма близкая к с. В таких условиях нужно пользоваться частной теорией относительности, причем масса

$$m = \frac{m_0}{[1-(v^2/c^2)]^{1/2}}.$$

В ньютоновской формулировке второго закона (см. выше) речь идет не о произведении массы на ускорение, а, на современном языке, об уравнении

$$\frac{d}{dt}(m\mathbf{v}) = \mathbf{F}. \tag{6}$$

Поэтому можно сказать, что формулировка Ньютона учитывает возможность зависимости массы от скорости. В этой связи Зоммерфельд пишет, что формулировка Ньютона «оправдалась прямо-таки пророчески» ([17], с. 10). К сожалению, автор настоящей статьи не знает, имеются ли в сочинениях или письмах Ньютона какие-либо замечания о возможной зависимости массы от скорости. Учитывая использованное Ньютоном определение массы, предположение об ее зависимости от скорости представляется невероятным. Поэтому ни о каком «пророчестве» говорить в данном вопросе не приходится.

Вместе с тем Ньютона действительно можно считать пророком. Чего стоят, например, два его замечания, которые С. И. Вавилов использовал в числе других в качестве эпиграфов к главам своей книги [33]:

«Не обращаются ли большие тела и свет друг в друга ? Превращение тел в свет и света в тела соответствует ходу природы, которая как бы услаждается превращениями».

«Не действуют ли тела на свет на расстоянии и не изгибают ли этим действием его лучей; и не будет ли caeteris paribus (при прочих равных условиях), это действие сильнее всего на наименьшем расстоянии?»

Разумеется, чтобы правильно оценить эти замечания, нужно помнить, что Ньютон склонялся к корпускулярной теории света. С этой точки зрения световые корпускулы порождаются (испускаются) и поглощаются, а также обладают массой как инертной, так и тяжелой. Не случайно поэтому, что на основе корпускулярной теории света еще в конце XVIII века было введено, по сути дела, представление о «черных дырах», а в самом начале XIX века вычислено отклонение световых лучей в поле Солнца (правда, при этом предсказывается отклонение, которое в два раза меньше вытекающего из общей теории относительности; см. [31]).

Точность классической механики ограничена и при учете квантовых эффектов, квантовой теории — ее начало в 1900 г. было положено Плавком (1858—1947). Один, достаточный здесь, критерий, обеспечивающий возможность пренебречь квантовыми эффектами в механике, состоит в требовании малости длины «волны материи» (длины волны де Бройля) $\lambda$ по сравнению со всеми характерными размерами и расстояниями $L$

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{mv} \ll L, \tag{7}$$

где $h = 2\pi\hbar = 6{,}63\cdot10^{-27}$ эрг·с — постоянная Планка, $m$ — масса рассматриваемого тела или частицы и $v$ — их скорость. Для движения Земли по орбите $L \sim 10^{13}$ см (большая полуось земной орбиты — астрономическая единица длины 1 а. е.= $1{,}496\cdot10^{13}$ см), $m \sim M_3 \sim 5\cdot10^{27}$ г, $v \sim 3\cdot10^6$ см·с$^{-1}$ и $\lambda \sim 10^{-60}$ см. Разумеется, длина волны $\lambda$ в этом случае столь мала, что ее использование в применении к макроскопическому телу, вообще говоря, не имеет никакого смысла. Даже при $m \sim 1$ г и $v \sim 1$ см с$^{-1}$, $\lambda \sim 6\cdot10^{-27}$ см, в то время как для электронов ($m \approx 10^{-27}$ г) уже $\lambda \sim 10/v$ см и квантовые эффекты могут быть существенны в макроскопических условиях, не говоря уже об атомных масштабах $L \sim 10^{-8}$ см.

Логически не исключено, что классическая механика ограничена не только, так сказать, с релятивистской и квантовой сторон (условия (5), (7)), но и еще в каких-то случаях. Так, не раз делались предположения о непригодности классической механики в применении к скоплениям галактик или самим галактикам, в силу огромных масс и расстояний, фигурирующих в этих случаях, и т. д. (несколько подробнее, например, см. [32], с. 149). Никаких реальных указаний на подобные ограничения не имеется, но если бы они

даже появились (это представляется нам крайне маловероятным), то в обсуждаемом здесь плане ничего бы не изменилось. Несомненно, даже при отсутствии каких-либо неизвестных ограничений механика Ньютона не абсолютна, она пригодна лишь с некоторой точностью, при пренебрежении релятивистскими и квантовыми эффектами. Однако в некоторой области ньютоновская механика точна и полна, или, как нам кажется удобным говорить, точна и полна в области ее применимости (см.[32], с. 299). Таким образом, роль и ценность ньютоновской механики не преходящи, они сохранятся навсегда. Навсегда сохранится и благодарная память потомства о Ньютоне и его «Математических началах натуральной философии».

## О НЬЮТОНЕ. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Великие люди, а тем более великие из великих, к числу которых принадлежит Ньютон, — предмет пристального внимания и интереса. Оснований для этого немало. В первую очередь можно указать на естественное желание заглянуть в «творческую лабораторию» и понять психологию исключительных людей. Играет роль и тот факт, что жизнь знаменитостей нередка по разным параметрам богаче жизни людей заурядных. Часто и материалов о великих людях больше сохранилось, тут и рукописи, и иные материальные «памятники», здесь и воспоминания современников (нередко, впрочем, противоречивые и не заслуживающие особого доверия). Нельзя не упомянуть также о специфическом интересе, который проявляется к жизни выдающихся личностей. Источник такого интереса довольно четко отразил Гёте, заметивший, что «для посредственности нет большего утешения, чем то, что и гений не минует смерти». Гёте подчеркнул и такую тривиальную истину: «И великий человек — всего лишь человек». А у всякого человека есть слабости. К тому же корреляция между «гением и злодейством», между ярким талантом и моральным обликом, если и существует, то далеко не всегда *).

Так или иначе, Ньютон — излюбленный объект биографических исследований, в частности, в последнее время [5,9,15]. Небогатая внешними событиями жизнь Ньютона, никогда не покидавшего Англию, никогда не женатого пуританина, была насыщена огромным внутренним содержанием. К тому же это была, к счастью, долгая жизнь (Ньютон скончался на 85-м году). Перед нами предстает и наделенный исключительным талантом юноша, у которого было тяжелое детство, и человек, способный на титанические усилия, потребовавшиеся для написания «Начал» (об этом см. ниже), и, как-то несколько неожиданно, хранитель или смотритель (warden), а затем директор (master) монетного двора в Лондоне **).

В разные периоды жизни поведение и, в какой-то мере, видимо, и сам характер Ньютона были далеко не одинаковыми. Приоритетные споры Ньютона (особенно с Гуком и Лейбницем) производят во многом неприятное впечатление. Тяжело читать [6] об отношениях между Ньютоном и известным астрономом Джоном Флемстидом (1646—1719), первым Королевским астрономом и создателем обсерватории в Гринвиче. Ньютон бывал с Флемстидом груб и несправедлив, но и Флемстид пишет о Ньютоне в весьма нелестных выражениях (С. И. Вавилов называет характеристику, данную Ньютону Флемстидом, шаржем). Какие страсти кипели в спорах между Ньютоном и Флемстидом, видно уже из такого факта. В 1712 г. Флемстид получил от Галлея

*) Распространено мнение вообще об отсутствии подобной корреляции. Как нам кажется, некоторая корреляция все же имеется, причем положительная (см.[32], с. 286).

**) Смотрителем монетного двора Ньютон стал в 1696 г. и в этой связи переехал иа Кембриджа в Лондон. Должность Ньютона отнюдь не была синекурой. Он несколько лет работал на монетном дворе с большим напряжением сил, увеличил его производительность в 8 раз, как утверждают, не поставив ни одного нового станка. Оставаясь директором (с 1699 г.) монетного двора, Ньютон с 1703 г. до самой смерти в 1727 г. был президентом Лондонского Королевского общества.

300 экземпляров звездного каталога, составленного Флемстидом, но изданного по настоянию Ньютона не в согласии с пожеланиями Флемстида. Все полученные им экземпляры книги Флемстид сжег.

Да, изображать Ньютона в качестве не только гения, но и образца всех высоких человеческих качеств значило бы искажать историческую правду. Но это нисколько не противоречит эпитафии, помещенной в начале настоящей статьи. Ньютон действительно был украшением рода человеческого. Что же касается его личных черт, то они противоречивы. Имели место, по-видимому, «подозрительность, раздражительность, преувеличенное мнение о собственной исключительности» (цитируется согласно [9], с. 97). Но, не говоря уже о замечательном таланте (а это, конечно, главное), были и совсем другие черты. Например, на автора настоящей статьи гораздо большее впечатление, чем непрезентабельные сведения о приоритетных и иных спорах, которые вел Ньютон, произвело свидетельство секретаря Ньютона (и его однофамильца) Хэмфри Ньютона, который выполнял свои обязанности с 1685 до 1689 г. Вот соответствующие выдержки (следуем [6], с. 120—121):

«В это время он писал свои «Principia», по его распоряжению я переписывал это великолепное произведение, прежде чем послать в печать...

Сэр Исаак был в это время очень любезным, спокойным и очень скромным и, по-видимому, никогда не впадал в раздражение; за исключением одного случая, я никогда не видел, чтобы он смеялся... Он постоянно был занят работой, редко ходил к кому-нибудь или принимал у себя гостей... Он не позволял себе никакого отдыха и передышки, не ездил верхом, не гулял, не играл в кегли, не занимался спортом; он считал потерянным всякий час, не посвященный занятиям. Редко уходил он из своей комнаты, за исключением только тех случаев, когда ему надо было читать лекции как люкасовскому профессору. Лекции мало кто посещал и еще меньше того понимал. Часто приходилось читать перед пустыми стенами. Посторонних он принимал с простотой и почтением; если его приглашали на ужин или обед, что случалось очень редко, он с удовольствием устраивал ответное угощение. Занятиями увлекался он настолько, что часто забывал обедать. Нередко, заходя в его комнату, я находил обед нетронутым на столе, и только после моего напоминания он, стоя, что-нибудь съедал. Я никогда не видел, чтобы он садился за обед сам, без напоминания. В тех редких случаях, когда он принимал гостей, присутствовало главным образом начальство колледжа. Раньше двух-трех часов он редко ложился спать, а в некоторых случаях засыпал только в пять, шесть часов утра. Спал он всего 4 или 5 часов, особенно осенью и весной, когда в его химической лаборатории ни днем ни ночью почти не прекращался огонь. Я не мог узнать, чего он искал в этих химических опытах, при выполнении которых он был очень точен и аккуратен; судя по его озабоченности и постоянной работе, думаю, что он стремился перейти черту человеческой силы и искусства. У Ньютона в это время не было ни учеников, ни товарищей по комнате, которые помогали бы ему в работе. Только один раз за все время он был болен и пролежал несколько дней в постели; страдания он выносил с большим терпением, совершенно безразлично относясь к жизни и смерти.

В лаборатории сэра Исаака было много химических приборов, однако чаще всего он пользовался плавильными тиглями, в которых расплавлял свои металлы. Иногда он справлялся в старой истлевшей книге, лежавшей в его лаборатории и носившей название: «Agricola: De Metallis». Превращение металлов было главной целью, а сурьма — главным ингредиентом... Иногда во время прогулки в саду Ньютон внезапно останавливался, взбегал по лестнице в свою комнату и, подобно Архимеду, начинал писать за своим пультом, забывая сесть...

Не найдя на лекции ни одного слушателя, Ньютон через четверть часа возвращался обратно. Он подолгу ходил в своей комнате взад и вперед, подобно ученику перипатетиков. Днем он никогда не спал. Думаю, его немало

печалила необходимость тратить время на еду и сон. Хотя у него была большая библиотека, о редко справлялся в книгах».

Какое напряжение всех сил, преданность науке, высокое горение!

За этим взлетом, кульминацией которого явились «Начала», последовал тяжелый период. В 1689 г. скончалась мать Ньютона, к которой, по ряду данных, он испытывал глубокую привязанность. Затем в его комнате случился пожар, уничтоживший, по-видимому, многие ценные рукописи. Наконец, на период 1690—1693 гг. приходится психическое расстройство, видимо, с манией преследования. Сам Ньютон, его родственники и ученики, а также биографы XVIII столетия тщательно скрывали факт болезни, но он несомненен. Возможно, сказалось колоссальное напряжение при создании «Начал». Существует гипотеза (насколько она обоснована, нам неизвестно), что Ньютон отравился во время своих химических и алхимических опытов и именно это явилось причиной психического расстройства.

В 1694 г. Ньютон уже возобновил прежнюю деятельность, но в нем явно произошел какой-то перелом. Как уже упоминалось, в 1696 г. Ньютон переезжает в Лондон, ему было тогда только 53 года (впрочем, можно сказать итак: ему было уже 53 года; ведь в те времена средняя продолжительность жизни была значительно ниже, чем теперь). Так или иначе, после создания «Начал» научная активность Ньютона резко снизилась, хотя он продолжал заниматься наукой, наряду с руководством монетным двором, богословской и некоторой другой деятельностью. Какова причина некоторого отхода Ньютона от науки? Трудно ответить на этот вопрос; в общем, это довольно обычное явление по достижении известного возраста и реализации задуманного в молодости. Интересно, однако, заметить, что речь не шла о потере блестящих способностей. Последнее ясно из такого примера. В 1696 г. известный математик Иоган Бернулли (1667—1748) предложил задачу о брахистохроне — о нахождении кривой, двигаясь по которой под действием силы тяжести некоторая масса достигает заданной точки за кратчайшее время. Бернулли и Лейбниц считали, что только развитый ими математический аппарат достаточно мощен для решения этой задачи и Ньютон, занявшийся чеканкой монеты, ее не решит [19]. Но не тут-то было. Вернувшись домой с монетного двора, усталый Ньютон принял вызов и в тот же вечер нашел решение. На следующее утро это решение было послано для опубликования без подписи. Однако когда Бернулли увидел решение, он воскликнул: «Лев виден по когтям»,— сомнений в авторстве не было (при изложении истории с задачей о брахистохроне мы опираемся на статью [19]; фактически эта история богаче содержанием и, видимо, изложена в [19] не вполне точно, что не относится к главному для нас в данном случае — возможности подчеркнуть исключительную мощь Ньютона). Ясность мысли Ньютон сохранил до конца. В последние годы жизни он становится добрее к людям, остро переживает столкновения с жестокостью и несправедливостью [9]. К периоду, близкому к концу жизни, относятся знаменитые слова Ньютона: «Не знаю, чем я могу казаться миру, но сам себе я кажусь только мальчиком, играющим на морском берегу, развлекающимся тем, что от поры до времени отыскиваю камешек, более цветистый, чем обыкновенно, или красивую раковину, в то время как великий океан истины расстилается передо мной неисследованным».

Именно этими словами С. И. Вавилов кончает свою ценную биографию Ньютона [6]. Поступим здесь иначе и в качестве заключения вернемся к оценке Ньютона и его деятельности со стороны Альберта Эйнштейна. Такой выбор понятен, ибо именно Эйнштейна нередко сравнивали и сравнивают с Ньютоном, называли вторым Ньютоном и третьим Архимедом (вторым Архимедом «читают Ньютона) *). Разумеется, всякие подобные сравнения достаточно

*) Еще в 1910 г. Планк назвал Эйнштейна «Коперником XX столетия», что несколько удивляет, поскольку общая теория относительности еще не была создана. Очевидно, Планк имел в виду частную теорию относительности, роль которой действительно в какой-то мере аналогична сделанному Коперником.

условны, но, бесспорно, со времен Ньютона не укажешь более крупной фигуры в физике, чем Эйнштейн. И вот что он писал в одной из своих статей в 1927 г. ([14], с. 82):

«На днях исполняется 200 лет со времени кончины Ньютона. Мы должны восстановить в памяти образ этого блестящего гения; он указал Западу пути мышления, экспериментальных исследований и практических построений, как никто другой ни до, ни после него. Ньютон не только создал гениальные методы; он в совершенстве владел всем известным в его время эмпирическим материалом и был исключительно изобретателен в нахождении математических и физических доказательств. По всему этому он заслуживает нашего высокого уважения. Но фигура Ньютона означает больше, чем это вытекает из его собственных заслуг, ибо самой судьбой он был поставлен на поворотном пункте умственного развития человечества. Чтобы это образно представить себе, вспомним, что до Ньютона не существовало законченной системы физической причинности, системы, которая бы как-то отражала более глубокие черты внешнего мира».

Такая оценка вклада Ньютона вполне гармонирует, как нам кажется, с известным двустишием английского поэта Александра Попа (1688—1744) *):

Nature and nature's laws lag hid in night.
God sad: «Let Newton be!» And all was light.

В заключение автор пользуется возможностью поблагодарить Б. А. Волкова, И. Ю. Кобзарева, И. С. Шапиро и И. А. Яковлева за замечания, сделанные ими при чтении рукописи.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
АН СССР

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ньютон И. Математические начала натуральной философии/Пер. с латин. с примечаниями и пояснениями А. Н. Крылова//Последнюю публикацию перевода см.: Крылов А. Н. Собрания трудов. Т. VII.— М.; Л: Изд-во АН СССР, 1936.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Механика.— М.: Наука, 1979.
3. Ландау Л Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т.1: Механика.— М.: Наука, 1973.
4. The Correspondence of Sir Isaak Newton. Vols I—VII.— Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1959—1977.
5. Westfall R. Never at Rest: A Biography of Isaak Newton.— Cambridge: Cambr. Univ. Press, 1982.
6. Вавилов С. И. Исаак Ньютон.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1945.— Эта книга помещена в «Собрании сочинений» С. И. Вавилова (М.: Изд-во АН СССР, 1956, т. 3), а также переиздана издательством АН СССР в 1961 г.
7. Кобзарев И. Ю. Ньютон и его время.— М.: Знание, 1978.
8. Исаак Ньютон: Сборник статей к трехсотлетию со дня рождения.—М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1943.
9. Современные историко-научные исследования (Ньютон): Реферативный сб.—М.: ИНИОН АН СССР, 1984. См. также: Науковедение: Реф. ж. 1980, № 5. С. 67, 73.
10. Льоцци М. История физики.— М.: Мир, 1970.
11. Паннекук А. История астрономии.— М.: Наука, 1966.
12. Гинзбург В. Л. Гелиоцентрическая система и общая теория относительности// Гинзбург В. Л. О теории относительности.— М.: Наука, 1979.
13. Белый Ю. А. Иоган Кеплер.— М.: Наука, 1971.
14. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. IV.— М.: Наука, 1967.

*) В [6] приводится такой перевод:

«Природы строй, ее закон в отвечной тьме таился.
И бог сказал: «Явись, Ньютон!» И всюду свет разлился».

В переводе С. Я. Маршака двустишие звучит так,:

«Был этот мир глубокой тьмой окутан.
Да будет свет! И вот явился Ньютон».

15. Карцев В. П. Исаак Ньютон.— М.: Молодая гвардия, 1987.— (Сер. «Жизнь замечательных людей»).
16. Ньютон И. Лекции по оптике/Пер. с латин. С. И. Вавилова.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946.
17. Зоммерфельд А. Механика.— М.: ИЛ, 1947.
18. Марочник Л. С. Свидание с кометой.— М.: Наука, 1985.— (Б-чка «Квант». Вып. 47).
19. Gingerich O. Newton, Halley and the Comet//Sky and Telescope. 1986. V. 71. P. 230.
20. Джеммер М. Понятие массы в классической и современной физике.— М.: Прогресс, 1967.
21. Мандельштам Л. И. Еще раз о силах инерции//УФН. 1946. Т. 28. С. 99; то же://Полное собрание трудов.— М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950.— Т. III. С. 323.
22. Ишлинский А. Ю. Механика относительного движения и силы инерции.— М.: Наука, 1981; Механика (идеи, задачи, приложения).— М.: Наука, 1985.— С. 504.
23. Седов Л. М. Очерки, связанные с основами механики и физики.— М.: Знание, 1983.
24. Эйлер Л. Теория движения тел//Основы динамики точки.— М.; Л.: Гостехиздат, 1938.
25. Neumann C. Über die Prinzipien der Galilei — Newton'schen Theorie.— Leipzig. 1870.
26. Voss A. Die Prinzipien der rationellen Mechanik//Enzyklopadie der Mathematische. Wissenschaften.— Leipzig, 1901—1908.— Bd. 4. Tl. 1.
27. Лауе М. Статьи и речи.— М: Наука, 1969.— С. 153, 266, 282.
28. Воронцов-Вельяминов Б. А. Лаплас.— М.: Наука, 1985.
29. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. Т. 1.— М.: Наука, 1965.
30. Pais A. Subtle is the Lord...//The Science and the Life of Albert Einstein.— Oxford: Oxford Univ. Press, 1982.
31. Гинзбург В. Л. Об экспериментальной проверке общей теории относительности// УФН. 1979. Т. 128. С. 435; см. также сборник статей, упомянутый в ссылке [12].
32. Гинзбург В. Л. О физике и астрофизике.— М.: Наука, 1985.
33. Вавилов С. И. Экспериментальные основания теории относительности//Собрание сочинений. Т. IV.— М.: Изд-во АН СССР, 1956.
34. Barbour J. Galileo, Free Fall, and the Law of Inertia//Contemp. Phys. 1985. V. 26. P. 397.
35. Хайкин С. Э. Физические основы механики.— М.: Наука, 1971.
36. Линец А. М. О системах отсчета классической механики//Эйнштеновский сборник, 1971.— М: Наука, 1972. С. 254.
37. Brehme R.W. On Force and the Inertial Frame//Amer. J. Phys 1985. V. 53. P. 952.
38. Goodinson P. A., Luffman B. L. On the Definition of Mass in Classical Physics//Ibidem. P. 40.
39. Историко-астрономические исследования.— М.: Наука, 1986.— С. 41.
40. Harrison E. Newton and the Infinite Universe//Phys. Today. 1986. V. 39, No. 2, P. 24.
41. Nobili A. M., Will C. M. The Real Value of Mercury's Perihelion Advance//Nature. 1986. V. 320. P. 39.