

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ПОНЯТИЯ МАССЫ

Для истории образования понятий полезно различать три стадии развития: 1) концептуализация (то есть процесс формирования); 2) систематизация (включение научного понятия в синтаксис научной системы); 3) формализация (формальное определение понятия в структуре дедуктивного представления науки). Эти стадии, конечно, взаимопроникают друг друга, и часто они настолько неразделимы, что их дифференциация становится безнадежной задачей. Кроме того, они не всегда выступают в указанном хронологическом порядке ¹.

Поскольку речь идет о понятии массы, его первая стадия — стадия концептуализации, — как мы уже видели в предыдущей главе, была в значительной мере результатом исследований Иоганна Кеплера. Вторая стадия осуществилась спустя долгое время, так что практически имел место разрыв в развитии. Причину этой задержки следует приписать подъему картезианской физики в первой половине семнадцатого столетия.

В противоположность мнению Лейбница Декарт не только не заимствовал понятие инерции у Кеплера, но он даже устранил эту идею из своей системы понятий относительно физической Вселенной. В письме к Мерсенну в декабре 1638 года он писал: «Я не признаю никакой инерции или природного сопротивления в телах» ². Единственное место, где он оценивает свою позицию в отношении этого понятия, содержится в письме к Бюне от 10 апреля 1639 года. В этом письме он обсуждает случай

¹ Особенно это очевидно в современной физике. Например, при открытии Дираком позитрона формализация предшествовала концептуализации.

² «Oeuvres de Descartes», ed. Charles Adam and Paul Tannery (Cerf, Paris), vol. 2 (1898), p. 466—467: «Je ne reconnais aucune Inertie ou tardiveté naturelle dans les corps».

удара тела о Землю, которая содержит, скажем, в тысячу раз больше материи, чем само тело. Благодаря тому факту, что в процессе удара передается количество движения, сообщаемое Земле только тысячную часть скорости тела, можно сказать, что «в этом смысле чем больше материи содержит тело, тем большей природной инерцией оно обладает»³.

В своих «Началах философии», где дано систематическое изложение его научных теорий, Декарт совершенно игнорирует это внутреннее свойство материи. Согласно Декарту, сущность материи заключается в пространственном протяжении; геометрия и принцип сохранения момента (точнее, декартова количества движения) управляют поведением физических объектов. Протяженность есть единственный существенный атрибут материи⁴. Даже если речь идет о столкновении тел, которые в нашей современной терминологии обладают инертными массами, Декарт применяет выражения: «Если бы тело *C*, обладающее несколько большей величиной, чем *B*...» или «Если, наоборот, покоящееся тело *C* сколько-нибудь меньше *B*...»⁵

Количество материи для Декарта есть объем. Вес и тяжесть представляют собой в его теории результат довольно сложной кинетики и являются просто случайными характеристиками, в общем случае непропорциональными количеству материи⁶. Трудно понять, как мог Декарт игнорировать тот факт, что два геометрически равных тела, подобных сплошному и пустотелому шарам равного радиуса, двигаются различным образом при взаимодействии с некоторым третьим телом.

Декартова концепция материи как протяженности вступила также в противоречие с современной ему теоло-

³ Ibid., p. 543—544: «Et pour ceque, si deux corps inégaux reçoivent autant de mouvement l'un que l'autre, cette pareille quantité de mouvement ne donne pas tant de vitesse au plus grand qu'au plus petit, on peut dire, en ce sens, que plus un corps contient de matière, plus il a d'Inertie Naturelle».

⁴ См. Р е н е Д е к а р т, Избранные произведения, М., 1950, стр. 466.

⁵ Там же, стр. 493, 494.

⁶ «Ejus quantitatem non respondere quantitati materiae cujusque corporis. Unde fit, ut ex sola gravitate non facile possit aestimari, quantum in quoque corpore materiae terristris contineatur»; «Principia philosophiae», part. 4, section 25; «Oeuvres», vol. 8, p. 214.

гисей. Если природа материи заключается в протяженности и если нет никакого посетителя этой протяженности, то томистическое (а также у Эгидия) объяснение евхаристического пресуществления теряет, так сказать, свое основание. То, что такое возражение было действительно выдвинуто против Декарта, видно из письма Габриеля Тибо к Мерсенну: «Если количество не отличается от телесной субстанции, так как после превращения хлеба и вина воспринимается количество, то что тогда представляет собой эта субстанция?»⁷ Отождествление материи с протяженностью лишает евхаристическую догму реального содержания. Имея в виду несовместимость теории Декарта с христианским учением, Конгрегация внесла его труды в список запрещенных книг 20 ноября 1663 года⁸.

Кеплерово понятие инерции как свойства, внутренне присущего покоящейся материи, отрицалось не только Декартом и его школой, но также, например, и Пьером Гассенди, противником картезианского рационализма. В своем сочинении «*De motu impresso a motore translato*» он критикует Кеплера⁹ и пытается показать, обращаясь к колебательному движению маятника, что материя не оказывает никакого сопротивления движению.

Эти аргументы, однако, еще до эпохи Ньютона не встретили всеобщего одобрения. В то время произошли фундаментальные изменения в понятии динамики свободного падения. Эти изменения в особенности усилили позицию Кеплера. Схоласты в соответствии с Аристотелем рассматривали вес как фактор, присущий самому тяжелому телу. В другом отношении их теория легкости испытывала серьезные концептуальные трудности. Как указал Дикстерус¹⁰, такая позиция не способствовала развитию той идеи, что материя имеет присущую ей пассивность. Однако если рассматривать тяжесть скорее

⁷ Письмо к Мерсенну (апрель 1647), «*Oeuvres*», vol. 5, p. 69. См. также письмо Арно к Декарту (*De re quanta a locali extensione non distincta*) от 3 июня 1648 г. *Ibid.*, vol. 5, p. 190.

⁸ См. G. D a n i e l, *Le voyage du monde de Descartes* (Paris, ed. 3, 1720), p. 140—143.

⁹ «*De motu impresso a motore translato*», 1st letter, sec. 15, «*Opera omnia*» (Florence, 1727), vol. 3.

¹⁰ E. I. D i j k s t e r h u i s, *Die Mechanisierung des Welthildes* (Springer, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1956), S. 409.

как внешнюю активность, чем внутренний принцип движения, тогда положение меняется.

Новое понятие тяжести, выдвинутое Дж. А. Борелли и И. Бекманом, дало основу для динамического понятия массы. Балиани в своем «De motu gravium» (1638) проводит различие между активным принципом, внешним по отношению к гравитирующему телу, и пассивным принципом, внутренне присущим материи. Их строгая пропорциональность мешает более тяжелому телу догонять легкое в процессе свободного падения.

Другим приближением, ведущим к понятию инертной массы, было исследование центробежных сил. Христиан Гюйгенс в своем трактате «О центробежной силе»¹¹ исследовал величину центростремительной силы вращающегося или обращающегося тела. Когда частицы движутся с равной скоростью по окружностям равного радиуса, то, полагал он, центростремительные силы относятся друг к другу, как веса или величины тел. В современной терминологии центростремительная сила выражается формулой $F = m \frac{v^2}{r}$. Силы, действующие на два тела, движущиеся с одной и той же скоростью v по окружностям одного и того же радиуса r , очевидно, удовлетворяют соотношению $F_1 : F_2 = m_1 : m_2$. Это именно то соотношение, которое имел в виду Гюйгенс, когда он говорил о величине тел¹².

Еще более важным в окончательном обосновании нового понятия инертной массы было систематическое исследование явлений удара как упругих, так и неупругих тел, проведенное Марси, Валлисом, Вреном и Гюйгенсом. И хотя термин «масса» не употреблялся в первых описаниях и исследованиях таких явлений удара, тем не менее ясно, что идея массы присутствовала здесь неявным образом. Рассмотрим, например, исследование Гюйгенсом упругого прямого удара двух «неравных» тел A и B , описанное

¹¹ Christiaan Huygens, De vi centrifuga (Opustula postuma; Leiden, 1703). Гюйгенс закончил исследование кругового движения около 1659 г. и опубликовал свои выводы в 1673 г. Полный текст этого исследования появился, однако, посмертно — в 1703 г.

¹² Henry Crew, The rise of modern physics (Williams & Wilkins, Baltimore, 1928), p. 121. Генри Круз усматривает в этом утверждении Гюйгенса первое количественное понятие массы.

в сочинении «О движении тел под действием удара» (1668). В теореме IX своей книги Гюйгенс показывает, как найти скорости тел A и B после удара в зависимости от их начальных скоростей. В его выводе, очевидно, было необходимо принять во внимание отношение инертных масс тел A и B , а сам вывод основан на том, что в современной терминологии называется принципом сохранения кинетической энергии (известен Гюйгенсу уже в 1652 году). Текст теоремы IX ясно показывает, что Гюйгенсу был известен этот факт; но, не имея еще ясного термина для выражения этой идеи, он мог говорить только о «величинах» A и B : «подобно тому, как B относится к величине A »¹³. Наконец, важное открытие было сделано в 1671 году Жаном Рише, который полагал, что вес тела есть функция места. Это открытие должно быть упомянуто как экспериментальное обоснование правильности концептуального базиса.

Кеплеровская концепция инерциального поведения материи, важные заключения, полученные от экспериментов по удару тел и динамике вращательного движения — все эти тенденции и результаты соединились в работе Исаака Ньютона и привели к систематизации понятия массы. Ньютон, который предпочитает говорить о количестве материи или просто о теле¹⁴, дает следующее определение понятию массы в «Математических началах натуральной философии»: *«Количество материи (масса) есть мера таковой, устанавливаемая пропорционально плотности и объему ее»*¹⁵. К этому определению добавляется следующее пояснение:

«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 отно-

¹³ «Propositio IX. Datus corporibus duobus inaequalibus, directe sibi occurrentibus...; invenire celeritates quibus utraque post occursum ferentur... Dividatur AB in C ut sit AC ad CB , sicut B ad A magnitudine...» «Oeuvres complètes de Christiaan Huygens» (The Hague, 1929), vol. 16, p. 65. О важности исследований явления удара для формирования фундаментальных понятий классической механики см. М а х J а m m e r, Concepts of force, p. 126.

¹⁴ См. В. Г. Ф р и д м а н, Об учении Ньютона о массе. «Успехи физических наук», т. 61, вып. 3, 1957.

¹⁵ И. Н ь ю т о н, Математические начала натуральной философии, в: «Собрание трудов академика А. Н. Крылова», т. VII, 1936, стр. 23. Далее везде даются ссылки на это издание.— *Ред.*

сится 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 по весу тела, ибо она пропорциональна весу, что мной найдено опытами над маятниками, произведенными точнейшим образом, как о том сказано ниже».

Прежде чем обсуждать в деталях это ньютоновское определение массы, необходимо сослаться на некоторые утверждения Ньютона, относящиеся к этой проблеме. Понятие плотности было не совсем точно определено в первом издании «Начал». Только в третьей книге, «Система мира», «тела одинаковой плотности» определяются как тела, «инерция которых пропорциональна их массам»¹⁶. Определение 2 вводит количество движения или, по современной терминологии, импульс: «Количество движения есть мера такового, устанавливаемая пропорционально скорости и массе». К этому добавляется следующее разъяснение: «Количество движения целого есть сумма количества движения отдельных частей его; значит, для массы вдвое большей при равных скоростях оно двойное, при двойной же скорости — четверное». Определение 3 описывает *vis insita*, или врожденную силу материи, как «*присущую ей способность сопротивления, по которой всякое отдельно взятое тело, поскольку оно предоставлено самому себе, удерживает свое состояние покоя или равномерного прямолинейного движения*»¹⁷. Особенно важно пояснение, данное этому определению:

«Эта сила всегда пропорциональна массе (*suo corpori*), и если отличается от инерции массы (*inertia massae*), то разве только воззрением на нее.

От инерции материи происходит, что всякое тело с трудом выводится из своего покоя или движения. Поэтому «врожденная сила» могла бы быть весьма вразумительно названа силой инерции (*vis inertiae*). Эта сила проявляется телом, единственно лишь когда другая сила, к нему приложенная, производит изменение в его состоянии. Проявление этой силы может быть рассматриваемо двояко: и как сопротивление (*resistentia*), и как напор (*impetus*). Как сопротивление — поскольку тело противится действующей на него силе, стремясь сохранить свое состояние; как напор — поскольку то же тело, с трудом уступая силе сопротивляющегося ему препятствия, стремится изменить состояние этого препятствия. Спро-

¹⁶ Там же, стр. 414.

¹⁷ Там же, стр. 125.

тивление обычно приписывается телам покоящимся, напор — телам движущимся. Но движение и покой при обычном их рассмотрении различаются лишь в отношении одного к другому, ибо не всегда находится в покое то, что таковым простому взгляду представляется»¹⁸.

Наконец, важно заметить, что три закона движения, которые следуют после этих определений, в явной форме не содержат понятия массы¹⁹.

Ньютоновское определение массы и инерциальной силы стали предметом бесчисленных комментариев и часто подвергались резкой критике. Интересное замечание было сделано Лесёром и Жакье в женевском издании «Начал» в 1739 году. Ссылаясь на определение 3, они утверждают, что сила инерции является свойством материи, инвариантным относительно движения или покоя. Переход от покоя к движению, говорят они, представляет собой столкновение с тем же самым воздействием на часть тела, как и переход от движения к покою²⁰. Выраженное в современной терминологии, их утверждение означает, что инерциальное сопротивление инвариантно относительно преобразований равномерно движущихся систем отсчета. В отношении ньютоновского определения массы Лесёр и Жакье замечают, что количество материи есть агрегат или сумма всех материальных частиц, из которых составлено тело. Если нет никаких промежутков между частицами, то, поясняют они, масса и объем тождественны²¹.

¹⁸ Там же, стр. 25—26.

¹⁹ Во втором законе используется понятие движения, в котором, согласно определению 2, в неявной форме содержится понятие массы. Объяснение, следующее за определением 8 величины центростремительной силы, является единственным местом в первых частях «Начал», где явно упоминается понятие массы как количества материи, кроме цитированного выше определения понятия массы. [В русском переводе «Начал» слова «количество материи» переведены словом «масса» (см. «Собрание трудов академика А. Н. Крылова», т. VII, стр. 28—29). — *Прим. перев.*]

²⁰ «*Vis illa inertiae eadem est in corporibus motis et quiescentibus; tam enim resistunt corpora actioni qua a quiete ad motum concitantur quam actioni qua a motu ad quietem reducuntur. Eadem equippe vis reguritur ad motum datum producendum et ad eundem extinguendum.*» «*Philosophiae naturalis principia mathematica*», ed. Thomas LeSeur and Franciscus Jacquier (Glasgow, ed. 2, 1760), p. 4.

²¹ *Ibid.*, p. 1: «*In corpore dato materiae quantitatem seu massam a corporibus magnitudine, aut volumine seu mole distingui oportet. Materiae quantitas est aggregatum, seu summa omnium materiae*

Если ньютоновское определение не рассматривать как определение неизвестного через неизвестное, то можно заключить, что для Ньютона понятие плотности было первоначальным понятием и оно предшествовало понятию массы ²². Эта интерпретация защищается Розенбергером ²³, а также Блоком ²⁴, которые указывают в этой связи на знаменитые эксперименты Бойля по сжимаемости воздуха, в которых понятие плотности играет важную роль и с которыми Ньютон был, несомненно, знаком. Подобным образом Г. Кру указывает, что во времена Ньютона плотность (отождествляемая с удельным весом), длина и время были тремя фундаментальными величинами в физике, а не масса, длина и время, как это имеет место в наши дни. «В такой системе,— пишет он,— естественно и логически допустимо определять массу в терминах плотности» ²⁵. Коуэн выражает согласие с точкой зрения Кру с некоторыми оговорками. Согласно Коуэну, интерпретация Кру должна была бы находиться в согласии с атомистическими воззрениями, из которых следует, что плотность в качестве фундаментального свойства тела представляет собой число частиц в единице объема. Но, добавляет Коуэн, «к сожалению, Ньютон благоразумно умалчивает относительно этого вопроса, и сделанные нами предположения не могут быть

particularum quibus compositum est corpus... Si nulla sint inter solidas corporis partes admixta foramina, massa et volumen non differunt».

²² Сэр Уильям Томсон и Питер Гатри Тейт [W. Thomson, P. G. Tait, *Treatise on natural philosophy*, vol. 1, part 1 (Cambridge, 1879), p. 220] замечают, что «в действительности это определение дает нам скорее определение плотности, чем определение массы». Интересно отметить, что даже в двадцатом столетии некоторые авторы все еще определяют массу в терминах плотности и зачастую плотность в терминах массы. См. P. G. Tait and W. J. Steele, *Treatise on the dynamics of a particle* (Macmillan, London, 1900), p. 42; E. J. Andrews and H. N. Howland, *Elements of physics* (Macmillan, London, 1903), p. 11; E. A. Bower, *An elementary treatise on analytical mechanics* (Van Nostrand, New York, 1904), p. 6.

²³ Ferdinand Rosenberger, *Isaac Newton und seine physikalischen Principien* (Leipzig, 1895), Teil 3, S. 173, 192.

²⁴ Leon Bloch, *La philosophie de Newton* (Paris, 1908), p. 140: «Cette idée n'a pas besoin d'être expliquée, Newton la considère comme claire par elle-même et il s'en sert pour définir les autres».

²⁵ Henry Crew, *The rise of modern physics*, ed. 2 (1935), p. 127 (см. сноску 12).

подтверждены прямыми высказываниями из „Начал“²⁶. Точно так же Берт видит в опытах Бойля основания к тому, чтобы Ньютон использовал понятие плотности при определении понятия массы. «В самом деле,— говорит Берт,— выбрав для ее определения в качестве окончательного свойства тел то из них, которое было более знакомо ему, чем известные в настоящее время, он едва ли мог поступить лучше»²⁷.

Подобная интерпретация была выдвинута Хоппе. Согласно этой интерпретации, Ньютон сделал допущение, что все фундаментальные частицы, из которых построена материя, имеют одинаковую плотность и один и тот же размер; плотность различных тел должна быть, таким образом, пропорциональной числу частиц в равных объемах. Плотность, следовательно, в качестве универсальной константы должна была быть более фундаментальным понятием, чем масса, и предшествовать ей²⁸. Хотя такая интерпретация может получить некоторое подтверждение в ньютоновском разъяснении, следующим за определением 2, и может также следовать из комментариев Лесёра и Жакье²⁹, тем не менее некоторые места из «Оптики» Ньютона, в частности, едва ли совместимы с интерпретацией Хоппе в пунктах, указанных Кеджори³⁰.

Приведем следующее утверждение Ньютона из его «Оптики», которое Кеджори не цитирует, хотя оно в этой связи особенно важно: «Бог в состоянии сотворить частицы

²⁶ I. B e r n a r d C o h e n, Franklin and Newton (American Philosophical Society, Philadelphia, 1956), p. 115.

²⁷ E d w i n A r t h u r B u r t t, The metaphysical foundation of modern science (Doubleday, New York, 1954), p. 241.

²⁸ E d m u n d H o p p e, «Archiv für Geschichte der Mathematik, der Naturwissenschaften und der Technik (новая серия)», 11, 354—361 (1929). Хоппе полагает, что это понятие плотности восходит к Бойлю, Гассенди, Кеплеру и Лубину.

²⁹ «Philosophiae naturalis principia mathematica», p. 3 (см. сноску 20): «Cum autem motus totius corporis sit aequalis summae motuum singularum Massae partium, seu elementorum, patet manente celeritate, motum totius massae crescere prout crescit numerus elementorum massae aequalium, seu quantitatem motus esse proportionalem massae».

³⁰ «Sir Isaac Newton's Mathematical principles of natural philosophy and his System of the world». Motte's translation revised by F. Cajori (University of California Press, Berkeley, 1947), Appendix, p. 638.

материи различных размеров и фигур и в нескольких отношениях к пространству и, возможно, различных плотностей и сил»³¹. Это высказывание важно не только потому, что оно явно противоречит допущению Хоппе, но также и потому, что своеобразное сопоставление «плотностей и сил» может подтвердить другую интерпретацию, которую мы изложим позднее. «Силы» здесь суть *vis inertiae*, о которых Ньютон упомянул несколькими строчками выше цитируемого места: «Эти частицы обладают не только *vis inertiae*, сопровождаемые пассивным законом движения как естественным результатом этой силы...»³² Более детальное изучение понятия плотности, имевшее место в эпоху Ньютона, показывает, что мнение Хоппе несостоятельно^{33*}.

Совершенно другой подход к интерпретации ньютоновского определения массы был предпринят Энрикесом³⁴. Пусть *G* представляет собой группу механических операций, содержащую перемещения, деления, перестановки, сжатия и расширения. Согласно Энрикесу, перед Ньютоном стояла задача найти аддитивный инвариант по отношению к группе *G*. Допустим, что части любых двух данных тел могут быть сделаны «равными» в том смысле, что одна из них может быть заменена другой посредством преобразований группы *G*. Выбирается стандартное тело *A* таким образом, что для каждой его части масса определяется как пропорциональная объему. Тогда для любого данного однородного тела *B* плотность находится в обратном

³¹ I. Newton, *Optiks* (Dover, New York, 1952), p. 403—404. Соответствующее место в русском издании «Оптики»: «Бог вначале дал материи форму твердых, массивных, непроницаемых, подвижных частиц таких размеров и фигур и с такими свойствами и пропорциями в отношении к пространству, которые более всего подходили бы к той цели, для которой он создал их» (И. Ньютон, *Оптика*, М., 1954, стр. 303).

³² *Ibid.*, p. 401. Соответствующее место в русском издании «Оптики»: «*Vis inertiae* есть пассивный принцип, посредством которого тела пребывают в их движении или покое...» (стр. 301).

³³ Ценная информация по истории понятия плотности в семнадцатом столетии содержится в статье *Helène Metzger*, *Newton: Sa définition de la quantité de matière et la loi de la conservation de la masse*, «*Archeion, Archivio di Storia della Scienza*», 9, 243—256, 1928.

³⁴ *Federigo Enriques*, *Problems of science*, trans. K. Royce (Open Court, Chicago, 1914), p. 269—271.

отношении его объема к тому из преобразованных элементов, который равен части от А. В этом смысле масса в конечном счете определяется как произведение объема и плотности. Но хотя оправдание Энрикесом ньютоновского определения логически безупречно, тем не менее оно звучит слишком искусственно и в значительной степени является гипотезой *ad hoc*, чтобы быть принятым в качестве исторической истины.

В противоположность этим попыткам найти некоторое логическое обоснование ньютоновскому определению понятия массы, Фолькман решительно возражает против ньютоновского определения, осуждая его как содержащее логический круг, так как плотность в свою очередь может быть определена только как масса в единице объема³⁵. Фолькман замечает: «Ньютон писал, что он не определяет время, пространство, место и движение как вещи хорошо известные всем. Ньютон с тем же правом мог бы заявить: „Я не определяю массу“»³⁶.

Фолькман в этой критике Ньютона следует Эрнсту Маху, который в своей «Механике»³⁷ характеризует ньютоновское определение как «несчастное» (*unglücklich*). Решительное возражение Маха против ньютоновского определения понятия массы объясняется не только логическим кругом в этом определении, это возражение направлено и против употребления терминов, подобных количеству материи, которые для Маха вообще не имеют никакого физического смысла. Действительно, необходимо отметить, что до критики Маха термины «количество материи», «масса» и т. п. употреблялись самым некритическим образом. Так, например, Брэгэм, член Королевского общества, писал в своих комментариях к «Началам»: «Определения — их восемь — содержат определение количества материи, которое относится к ее объему и плотности, при этом плотность выражает отношение массы материи к ее объему»³⁸.

³⁵ Paul Volkman, Erkenntnistheoretische Grundzüge der Naturwissenschaften und ihre Beziehungen zum Geistesleben der Gegenwart (Teubner, Leipzig und Berlin, Aufl. 2, 1910), S. 359.

³⁶ Ibid., S. 126.

³⁷ Э. Мах, Механика. Историко-критический очерк ее развития, СПб, 1909.

³⁸ Henry, Lord Brougham, Analytical view of Sir Isaac Newton's Principia (London, 1855), p. 13.

Проблема ньютоновского определения массы может быть, конечно, объяснена ссылкой на то, что Ньютон просто заимствовал у Кеплера идею, выраженную в его труде «Введение в трактат о мире, содержащее в себе тайну Вселенной»³⁹, где Кеплер указывает на объем тела и на плотность его материи как на составные факторы инерции. Однако более критический анализ трудов Ньютона требует, по-видимому, другого объяснения. Необходимо иметь в виду, что в ньютоновской концепции материи доминируют два первоначально независимых понятия — количество материи и инерция. В своих правилах умозаключений, изложенных в книге III «Начал», Ньютон следующим образом характеризует универсальные свойства всех тел: *«Такие свойства тел, которые не могут быть ни усиливаемы, ни ослабляемы и которые оказываются присущими всем телам, над которыми возможно производить испытание, должны быть почитаемы за свойства всех тел вообще»*⁴⁰. Протяженность, непроницаемость и подвижность присущи телу в целом в силу того, что эти свойства существуют в его частях. Они являются свойствами, применимость которых, можно сказать, распространяется как на фундаментальные частицы, так и на макроскопические тела, состоящие из этих частиц. Согласно Ньютону, то же самое относится и к инерции, тогда как тяготение, благодаря тому что оно уменьшается с расстоянием от центрального тела, не относится к универсальным свойствам материи. «Я отнюдь не утверждаю, — говорит Ньютон, — что тяготение существенно для тел. Под врожденной силой я разумею единственно только силу инерции. Она неизменна. Тяжесть при удалении от Земли уменьшается»⁴¹.

Протяженность, непроницаемость и подвижность несли ту же функцию и в теории материи Декарта; твердость была существенна для атомистической философии. Но каким образом врожденная сила, *vis insita* или *vis inertiae*, стала универсальным свойством материи? Хотя, как утверждает Ньютон, «неактивная сила» воздействует

³⁹ J. Kepler, «Opera omnia», ed. C. Frisch (Frankfort and Erlangen), vol. I (1858), p. 161.

⁴⁰ И. Ньютон, Математические начала натуральной философии, стр. 503.

⁴¹ Там же, стр. 504.

только тогда, когда другая сила стремится изменить состояние тела, тем не менее эта сила как таковая существует в теле все время как бы в состоянии спячки. Требование ее существования исторически обусловлено. Хорошо известно, что догалилеевская физика не смогла сформулировать закон инерции и открытие этого закона должно было дожидаться времен Беекмана, Гассенди и Декарта*. Частично это объясняется концептуальной несовместимостью этого закона со схоластическим требованием: «Покоящаяся причина вызывает покой». За исключением немногих авторов, таких, как Альгазен или Оливий, средневековая философия рассматривала причинный процесс как мгновенный и считала, что исчезновение причины ведет немедленно к исчезновению следствия. Движение, следовательно, предполагает действующую силу в течение того времени, пока оно существует.

В механике Ньютона причиной равномерного движения является инерция, которая в неявной форме играет роль «действующей силы». В самом деле, инерция представляет собой не только сопротивление изменению движения, но является также «силой, упорно сохраняющей движение»⁴². Кроме того, она не является силой в общепринятом смысле этого слова. В схоластической философии сила без сопротивления никогда не может вызвать (конечного) движения. В механике Ньютона сила без противоположной силы, согласно принципу равенства действия и противодействия, не имеет смысла. Инерция, таким образом, приобретает характер реальной силы только в изменении движения. Различные тела, согласно Ньютону, оказывают различные сопротивления. В настоящее время классическая, или, как обычно говорят, ньютоновская, механика рассматривает это сопротивление изменению движения, различное для различных тел, но постоянное для одного и того же тела, как окончательную и абсолютную характеристику данного тела. «Инертная масса», как называют этот абсолютный параметр, становится, таким образом, несводимой величиной, от которой зависят другие параметры, но которая сама ни от чего не зависит. Но для самого Ньютона это не так! Ньютон постулировал пропорциональность между инер-

⁴² Там же.

цией и другой фундаментальной характеристикой данного тела — количеством материи⁴³. Таким образом, для Ньютона — в противоположность «ньютоновской механике» — инертная масса является редуцированным свойством физических тел, зависящим от их количества материи. Для Ньютона понятие количества материи еще имеет физический смысл. Если тела равного объема обладают различными инерционными силами, то их количество материи также должно быть различным. Фактор «интенсивности», в общем случае независимый от объема, рассматривался как ответственный за различное количество материи в телах равного объема. И этот фактор, в силу того что свойство инерции является универсальным, должен быть также характеристикой предполагаемых мельчайших частиц. В чисто интенсивном, количественном смысле этот фактор, несводимый подобно понятию сродства в классической химии, отождествлялся Ньютоном с плотностью.

Конечно, всегда трудно определить точно, идет ли речь о двух понятиях или только об одном, когда устанавливается общая пропорциональность между количеством материи и инерцией. Тщательная проверка, например, текста книги III «Начал» ясно показывает, что именно количество материи в первоначальном смысле этого слова определяет величину гравитационного притяжения⁴⁴. Это также наводит на мысль, что, постулируя пропорциональность между количеством материи и инерцией, Ньютон находился под влиянием работы Балиани «О гравитационном движении»⁴⁵, хотя доказательства этого малоубедительны.

Тот факт, что тяжесть, или вес, пропорциональна количеству материи для данного места, был показан Ньютоном с помощью серии опытов, которые он описал в книге III (предложение VI, теорема VI)⁴⁶. Ньютон

⁴³ См. пояснение Ньютона, цитированное после определения 3, стр. 71—72 данной книги.

⁴⁴ «Все тела по соседству с Землею тяготеют к Земле, и притом пропорционально количеству материи каждого из них» (И. Ньютон, Математические начала..., стр. 504).

⁴⁵ Это допущение было сделано в статье Чайлда «Ньютон и искусство открытия», в кн.: «Isaac Newton: 1642—1727», ed. W. J. Greenstreet (Bell, London, 1927), p. 127.

⁴⁶ И. Ньютон, Математические начала..., стр. 514—515.

Заготовил две равные деревянные кадочки; одну из них он наполнил деревом, а в другую поместил точно такой же груз из золота в центре качаний. Используя эти кадочки в качестве маятников с равными длинами подвеса, он заметил, что их периоды равны. Ньютон пишет: «Будучи помещены рядом, они при равных качаниях шли взад и вперед вместе в продолжение весьма долгого времени». Отсюда он заключил, что «количество материи в золоте относится к количеству материи в дереве... как вес одного к весу другого». Рассуждения Ньютона, выраженные в современной доэйнштейновской терминологии, состояли в следующем. Для маятника длины L в области, где постоянная свободного падения g , период T , выражается формулой $T = 2\pi (L/g)^{1/2}$; с другой стороны, вес W и количество материи m связаны соотношением $W = mg$. Таким образом, $T = 2\pi (mL/W)^{1/2}$ или $W/m = 4\pi^2 L/T^2$. Так как эксперименты показывают, что полученное отношение L/T^2 не зависит от того, из какого материала — дерева, золота, свинца, стекла, песка или пшеницы — изготовлены маятники, то отношение W/m между весом и количеством материи постоянно. Ньютон заканчивает описание своих экспериментов замечанием, что «разность количества материи, даже меньшая одной тысячной доли всего тела, могла бы быть с ясностью обнаружена этими опытами».

Эти эксперименты, повторенные более тщательным образом Ф. В. Бесселем в 1832 году ⁴⁷, объясняют употребление весов для сравнения или определения величины масс.

Несмотря на пропорциональность, вес и масса совершенно различные понятия. И это было экспериментально показано Жаном Рише. Посланный Французской академией в Кайенну (Французская Гвиана) с целью произвести астрономические наблюдения для определения солнечного параллакса и осуществить измерения, он заметил,

⁴⁷ F. W. B e s s e l, Studies on the length of the seconds pendulum; его же: «Experiments on the force with which the earth attracts different kinds of bodies»; см. «Abhandlungen der Preussischen Akademie» (1826 и 1830); см. также «Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie» 25, 1—14 (1832) и 26, 401—411 (1833). Среди веществ, использованных Бесселем, были метеорное железо и метеорные камни.

что его маятниковые часы отставали в сравнении со средним движением Солнца ежесуточно на $2\frac{1}{2}$ минуты ⁴⁸. Ньютон ссылается на эти наблюдения в своих «Началах» в предложении XX под названием: «Найти и сравнить между собой веса тел в разных областях Земли» ⁴⁹. Вес, который до тех пор рассматривался вообще как фундаментальное и часто существенное свойство материи, обнаружил свою сводимость к массе и ускорению. Количество материи, или масса, и вес стали сразу же двумя совершенно различными понятиями. Техническое значение первого понятия как массы и его резкое противопоставление весу хотя неявно и содержалось в «Началах», тем не менее впервые было ясно подчеркнуто И. Бернулли в его сочинении «Размышления о природе колебаний» ⁵⁰. В этой работе И. Бернулли утверждает, что масса, умноженная на ускорение свободного падения, есть вес тела.

⁴⁸ «Observations... par Monsieur Richer de l' Académie Royale des Sciences», «Mémoires», vol. 7, part 1 (Paris, 1729), p. 233—326.

⁴⁹ И. Н ь ю т о н, Математические начала..., стр. 537.

⁵⁰ «Opera omnia» (Lausanne and Geneva, 1742), vol. 2, p. 169: «Ex ratione materiae quantitatis, quam vocabo massam vel molem, et ex ratione gravitatum acceleratricium; componendo namque duas posteriores nascitur ratio ponderum».