

ФОРМИРОВАНИЕ ПОНЯТИЯ ИНЕРТНОЙ МАССЫ

Понятие количества материи продолжало играть немаловажную роль в средневековой науке, хотя оно и редко удавалось точно определить. Например, теория импульса, развитая Буриданом и его школой в четырнадцатом столетии, требует понятия количества материи для того, чтобы описать экспериментальный факт, состоящий в том, что действие одной и той же силы вызывает различные движения, заставляя камень двигаться дальше, чем перо или кусок железа, дальше, чем кусок дерева того же размера. Объяснение, выдвинутое Буриданом, исходит из допущения, что

«...причина этого заключается в том, что вместилище всех форм и природных особенностей находится в материи и обуславливается материей. Следовательно, чем больше имеется материи, тем больше импульс может получить тело и большей интенсивности. В плотном и тяжелом теле при прочих равных условиях имеется больше перво-материи, чем в разреженном и легком»¹.

Идея Буридана о пропорциональности между импульсом и количеством материи согласуется с общим правилом количественного соответствия между формой и материей². Это правило рассматривается как применимое не только к субстанциальным формам, но также и к силам и вообще к таким величинам, как импульс, теплота, холод, сухость. Буридан поясняет, что большая способность к импульсу у большего вращающегося мельничного колеса служит при прочих равных условиях причиной более трудной

¹ Buridan, *Quaestiones super octo libros Physicorum*, book 8, question 12 (Paris, 1509); английский перевод 12-го вопроса в кн.: Marshall Clagett, *The science of mechanics in the Middle Ages* (University of Wisconsin Press, Madison, 1959), документ 8 (2), p. 535.

² «Forma multiplicatur et dividitur secundum multiplicationem et divisionem materiae in qua est». Буридан ссылается на эту пропорциональность еще раз в книге 7 своих комментариев по физике, вопросы 7 и 8 (см. сноску 1).

остановки его движения, чем у меньшего колеса. Согласно Буридану и его школе, количество материи, представленное в теле, существенно определяет сопротивление, которое оказывает физический объект движущей силе. Хотя здесь сопротивление все еще, как и у Аристотеля, рассматривается как реальная сила, все же эта теория импульса поразительно близко подходит к понятию инертной массы. Однако импульс еще не был количеством движения, а сопротивление еще не было инерцией.

Подобный пример неявного признания количества материи в связи с теорией импульса можно найти в «Вопросах по восьмой книге физики Аристотеля» Альберта Саксонского³ и в «Трактате о небе и мире» Николая Орезмского⁴.

Другим предметом, естественно требовавшим применения нашего понятия, была проблема разрежения и плотности, которая сама по себе и независимо от ее использования в теологии продолжала привлекать внимание средневековой науки. Так, Ричард Свайнсхед уделил значительное место вопросу разрежения и уплотнения в своей «Книге исчислений». «Вещь уменьшает свою плотность пропорционально отношению ее величины к ее материи и увеличивает свою плотность согласно отношению ее материи к ее величине»⁵. В следующем высказывании можно усмотреть предвосхищение или аналогию с уравнением непрерывности в классической теории поля:

«Если два тела имеют разные размеры и различную плотность и отношение величины более плотного тела к величине другого меньше, чем отношение их соответствующих плотностей, если они приобретают или теряют плотность с равной скоростью, то более плотное тело будет терять или приобретать величину более медленно, чем разреженное тело»⁶.

Линн Торндайк в статье об «Анонимном трактате из шести книг по метафизике и натурфилософии»⁷, написан-

³ Albertus de Saxonia, *Quaestiones super octo libros Physicorum* (Venice, 1500?).

⁴ Nicole Oresme, *Le livre du ciel et du monde*, ed. A. D. Menut and A. J. Denomy, «*Mediaeval studies*», vols. 3—5 (Toronto 1941—1943).

⁵ Richard Swineshead, *Liber calculationum* (Padua, 1477), fol. 17r. Цит. по: Lynn Thorndike, *A history of magic and experimental science*, vols. 3 (Columbia University Press, New York, 1934), p. 378.

⁶ *Ibid.*, fol. 21v.

⁷ «*Philosophical Review*», 11, 317—340 (1931).

ном в четырнадцатом столетии, замечает, что «нечто приближающееся к понятию массы, кажется, содержится в утверждении, что многие древние и современные (ученые) различают *непрерывное количество, или вес, и определенное количество*».

Эти примеры показывают, что еще до возникновения классической механики в шестнадцатом и восемнадцатом столетиях понятие количества материи было необходимым для формулировки физических законов. Но хотя эта необходимость сильно ощущалась, тем не менее само это понятие было еще неопределенным и туманным. Даже итальянская философия естествознания эпохи Возрождения, которая в целом внесла важный вклад в систему понятий современной науки, удивительно мало сделала для разъяснения этой ситуации. Галилей, например, в сочинении «Пробирщик», излагая свою философию науки, замечает:

«Как только я представляю себе какую-либо материальную или телесную субстанцию, я сразу же чувствую необходимость мыслить ее как ограниченную, имеющую ту или иную форму, как большую или малую в отношении к другим вещам и находящуюся в некотором определенном месте и в некоторое данное время; как существующую в движении или в покое; как соприкасающуюся или не соприкасающуюся с другими телами; как существующую в виде одной, нескольких или многих. Я не могу отделить субстанцию от этих условий, как бы ни напрягал свое воображение»⁸.

Галилей перечисляет здесь первичные свойства материи: форму, размер, местоположение, соприкосновение, число, движение. Все эти свойства являются геометрическими (форма, размер, местоположение, соприкосновение), арифметическими (число) или кинематическими (движение). В этом списке совершенно отсутствует указание на какой-либо негеометрико-временной аспект материи. Только Эвангелиста Торричелли — долгое время спустя после разъяснения понятия массы Кеплером — добавляет массу в качестве величины, характеризующей первичные свойства материи. Сантиллана в интересном примечании к изданию «Диалогов о главнейших системах мира»⁹

⁸ «Discoveries and opinions of Galileo», trans. Stillman Drake (Doubleday, New York, 1957), p. 274.

⁹ Galileo Galilei, Dialogue on the great world systems, ed. Giorgio de Santillana (University of Chicago Press, Chicago, 1953), p. 252.

Галилея описывает воззрения Галилея на массу следующим образом.

«Таким образом, имеются математические свойства, присущие материи. Но масса, несмотря на то что она поддается математическому выражению, не является одним из таких свойств, так как она представляет собой лишь другое название для самой материи и позволяет отличать материю от абстрактной материи, которая геометрична. Физическая реальность и масса — это два названия для одной и той же вещи, которая обладает движением, в то время как геометрические формы не обладают им. Следовательно, масса не может быть определена в терминах чего-либо другого; она первична».

Имеется, однако, несколько мест в работах Галилея, которые предполагают идею инертной массы. В «Диалогах о главнейших системах мира» Сальвиати, например, спрашивает: «Не существует ли в теле, кроме естественной склонности к противоположному пределу (в тяжелом теле, имеющем тенденцию двигаться вниз, существует сопротивление движению вверх), еще и другое внутреннее и естественное свойство, которое заставляет его сопротивляться движению»¹⁰. Галилей еще не мог ясно осознать, что это и есть то «внутреннее свойство», которое приводит к независимости скорости падающего тела от его веса — результат, для проверки которого он провел свои исторические эксперименты с металлическим шаром на наклонной плоскости.

Физика Галилея не выработала точной формулировки и даже не обнаружила явного признания того, что, кроме длины и времени, необходимо обосновать наиболее фундаментальное понятие классической физики. Только кеплеровская астрономия заполнила этот пробел и, таким образом, закончила возведение основания, на котором гений Ньютона смог построить величественное здание классической механики.

Обработывая точные данные наблюдений Тихо Браге, Кеплер пришел к выводу, что необходимо отказаться от традиционного понятия кругового и равномерного движения небесных тел. В 1609 году он открыл, что допущение эллиптических орбит для планетных движений вполне согласуется с теми данными наблюдений, которыми он располагал. Замена кругов эллипсами вызвала, однако, новые трудности. Круговое движение со времен Платона

¹⁰ Ibid., p. 228.

считалось естественным движением планет в силу простоты, совершенства и непрерывности ¹¹. Кеплер, естественно, должен был столкнуться со следующей проблемой: является ли движение планет по эллипсу естественным движением? Действительно ли понятие естественности есть первичное понятие или оно сводимо к причинному отношению, основанному на более фундаментальных законах природы? Поиски динамического объяснения планетных движений стали, таким образом, основным занятием Кеплера.

В нашем историческом анализе понятия силы ¹² было показано, как Кеплер в поисках такого динамического объяснения развил идею физической силы из рудиментарного понятия «сила жизни», используя принцип «нематериального начала». Этому способствовало астрономическое исследование зависимости скорости планеты от расстояния. Формирование понятия массы у Кеплера шло тем же путем, что и формирование понятия силы. Существуют два дополнительных аспекта одного и того же мыслительного процесса. Именно таким образом понятие массы дополняет понятие силы. Понятие силы у Кеплера развилось из идеи активности разума, души или чистой формы, понятие массы — из понятия материи. Традиционное противопоставление *формы* и *материи* явилось общей основой для двух понятий. Кеплер обнаружил, что фактор, действующий противоположно активной силе, должен находиться в самой материи, так как, согласно неоплатонической традиции, природа материи именно такова, что она оказывает сопротивление реализации формы.

Первое упоминание о таком сопротивлении материи движению и о тенденции к покою, присущей материи, содержится в работе Кеплера «О новой звезде» ¹³. Он еще

¹¹ См., например, «Сочинения Платона», Тимей и Критий, Киев, 1883, стр. 101, 102. 40; Aristotle, De caelo, 268b, 15—21, 269a, 19—20, 24—26, 270b, 32—33; Аристотель, «Физика», 223b, 21—24, 241b, 20, 265a, 15; Simplicius, Commentarium in Aristotelis De caelo, 498a, 46b, 3.

¹² M a x J a m m e r, Concepts of force, p. 81—93.

¹³ K e p l e r, De immensitate sphaerae fixarum in hypothesis Copernici: deque Novi Sideris magnitudine, «Opera omnia», ed. C. Frisch (Frankfort and Erlangen), vol. 2, (1859): «Nam quietem quidem loci seu ambientis corporis affectant renitentia et quodam quasi pondere (quid ridetis coelestium inexperti philosophastri,

не употребляет термина «инерция», но объясняет сопротивление по аналогии с весом. Несколько лет спустя он проводит между ними более существенное различие¹⁴. В своей «Новой астрономии с комментариями о движении Марса»¹⁵ Кеплер выводит материальную природу планет из их несомненной и внутренне присущей им склонности к отсутствию движения. В тех же «Комментариях» он использует понятие массы (которое он обозначает *moles*) в динамическом смысле как сопротивление взаимному притяжению:

«Если поместить два камня в каком-либо месте мира вблизи друг от друга и вне сферы влияния третьего тела, то два камня, подобно двум магнитам, сойдутся друг с другом в некотором промежуточном месте, притягивая один другого на расстоянии, пропорциональном массе другого»¹⁶.

Интересно заметить, что это утверждение могло в принципе служить операциональным определением отношений масс, аналогичным до некоторой степени сравнительно недавнему определению Маха (относительной) массы. Но как мы уже заметили, в связи с подобной ситуацией при рассмотрении формирования понятия силы Кеплером¹⁷ такая методологическая трактовка была еще чужда концептуальной схеме Кеплера. Действительно, Кеплер нигде не ссылается на приведенное утверждение, сделанное им в «Новой астрономии». Важным свойством материи остается для него присущая ей тенденция оставаться на своем месте. В «*Tertius interveniens*» (1610) он подчеркивает:

rerum imaginarium copia locupletes, verarum egentissimi?), ex quo singulis suae obveniunt periodi temporum (nam quod motorem attinet, is unicus est et uniformiter movet).

¹⁴ «*Epitome astronomiae Copernicanae*» (1618), book 4, part. 3, «*Opera Omnia*», vol. 6 (1896), p. 374: «*Pondus ergo tribuis planetae? Dictum est in superioribus pro pondere considerandum esse naturalem illam materialem renitentiam seu inertiam...*»

¹⁵ «*Astronomia nova aitiologetos seu physica coelestis, tradita commentariis de motibus Stellae Martis*» (1609), part 3, chap. 34, «*Opera Omnia*», vol. 3 (1860), p. 305: «*Necesse est igitur, ut planetariorum globorum natura sit materiata, ex adhaerente proprietate inde a rerum principio prona ad quietem seu ad privationem motus.*»

¹⁶ *Ibid.*, p. 151: «*Si duo lapides in aliquo loco mundi collocarentur propinqui invicem extra orbem virtutis tertii cognati corporis, illi lapides ad similitudinem duorum magneticorum corporum coirent loco intermedio, quilibet accedens ad alterum tanto intervallo, quanta est alterius moles, in comparatione.*»

¹⁷ M a x J a m m e r, *Concepts of force*, p. 88—89.

«Что касается меня, то я утверждаю, что небесные тела имеют свойство находиться в одном и том же месте в небе, где бы они ни были найдены, если они не совершают движения»¹⁸.

В «Сокращении коперниковой астрономии» (1618), первом учебнике по коперниканской астрономии, проявляется явное влияние неоплатонического мышления на убеждения Коперника: «Любое небесное тело в силу его материальности обладает природной неспособностью двигаться из одного места в другое, т. е. природной инерцией покоя, в каком бы месте оно ни находилось»¹⁹.

Превращение метафизических спекуляций в физическое мышление — процесс, делающий особенно важным вклад Кеплера в образование современных научных понятий, — совершается в следующем заключении.

«Если бы материя небесных тел не обладала инерцией, подобной весу, то не требовалось бы почти никакой силы для того, чтобы привести их в движение; ничтожной силы было бы достаточно для того, чтобы сообщить им бесконечную скорость. Так как, однако, периоды планетных обращений занимают определенное время (некоторые планеты имеют более короткий период, а другие более длинный), то ясно, что материя должна иметь инерцию, которая объясняет эти различия»²⁰.

Не будет, конечно, преувеличением сказать, что подобное утверждение качественно предвосхищает второй закон Ньютона.

¹⁸ «Opera Omnia», vol. 1 (1858), p. 590: «Für mein Person sage ich, dass die Sternkugeln diese Art haben, dass sie an einem jeden Ort des Himmels, da sie jedesmal angetroffen werden, stillstehen würden, wann sie nicht getrieben werden solten».

¹⁹ «Opera Omnia», vol. 6 (1896), p. 341: «Globus aliquid coelestis habet tamen ratione suae materiae naturalem adinamiam transeundi de loco in locum, habet naturalem inertiam seu quietem qua quiescit in omni loco, ubi solitarius collocatur».

²⁰ «De causis planetarum», ibid., p. 342: «Nam si nulla esset inertia in materia globi coelestis, quae sit ei velut quoddam pondus, nulla etiam opus esset virtute ad globum movendum: et posita vel minima virtute ad movendum, iam causa nulla esset, quin globus in momento verteretur. Iam vero cum globorum conversiones fiant in certo tempore, quod in alio planeta est longius, in alio brevius. Hinc apparet, inertiam materiae non esse ad virtutem motricem, ut nihil ad aliquid». К этому месту имеется примечание: «Unde probas, materiam coelestium corporum reniti suis motoribus et ab iis, velut in libra pondera a facultate sua motrice? Probatur hoc primo ex periodicis temporibus convolutionis globorum singulorum circa suos axes, ut Telluris tempore diurno, Solis tempore 25 dierum circiter».

Несколькими страницами ниже Кеплер описывает процесс движения как столкновение двух противоположных факторов. Он объясняет, что в движении планет «имеет место борьба перемещающей силы Солнца и импотенции, или материальной инерции, планет» ²¹. Таким образом, инерция, согласно Кеплеру, означает не только неспособность материи к перемещению самой себя из одного места в другое, но имеет также активный аспект: она «противоположна» сообщенному извне движению. И это сопротивление, или противоположность движению, находится в прямой зависимости от количества материи. «Инерция, или противоположность движению, есть характеристика материи; она тем больше, чем больше количество материи в данном объеме» ²².

Это утверждение Кеплера чрезвычайно важно с исторической точки зрения. Мы видим здесь связь понятия количества материи у схоластов (в терминологии Кеплера — *coria materiae*) с его новым понятием инертной массы. Существует, конечно, возможность интерпретировать выражение «количество материи, содержащейся в данном объеме» как обозначающее плотность; в таком случае, очевидно, можно сказать, что Кеплер имеет в виду свою инерцию как величину, пропорциональную плотности материи. Эта интерпретация находит некоторое подтверждение в примечании, которое Кеплер добавил во втором издании (1621) своего труда «Введение в трактат о мире, содержащее в себе тайну Вселенной», первоначально опубликованного в 1596 году:

«Планетные тела... не следует рассматривать как математические точки, но, очевидно, как материальные тела, наделенные чем-то подобным весу или, точнее, внутренней способностью сопротивления движению, которая определяется объемом тела и плотностью его материи» ²³.

²¹ Ibid., p. 345—346: «At dictum est hactenus, praeter hanc vim Solis vectoriam esse etiam naturalem inertiam in planetis ipsis ad motum, qua fit, ut inclinati sint, materiae ratione, ad manendum loco suo. Pugnans igitur inter se potentia solis victoria et impotentia planetae seu inertia materialis».

²² Ibid., p. 174—175: «Materiae enim... propria inertia, repugnans motui, eaque tanto fortior, quanto major est copia materiae in angustum coacta spatium».

²³ «Opera omnia», vol. 1, p. 161: «Corpora planetarum in motu seu translatione sui circa Solem non sunt consideranda ut puncta mathematica, sed plane ut corpora materiata et cum quodam quasi

Хотя Кеплер еще не осуществил научной систематизации нового понятия — это сделал Ньютон несколько десятилетий спустя, — тем не менее он придал понятию материи как инертной массы его научную значимость. Возможно, что именно это обстоятельство имел в виду Лейбниц, когда утверждал, что не кто иной, как Кеплер, первый выдвинул идею инерции и что Декарт заимствовал это понятие у Кеплера. Необходимо, однако, допустить, что у Кеплера понятие инерции относится исключительно к невозможности спонтанейного движения или к сопротивлению переходу из состояния покоя в состояние движения (ускорение). В уже ранее цитированном утверждении²⁴ он явно говорит о «грузности» материи и ее неспособности перемещаться из одного места в другое. Инерция в смысле сохранения однажды сообщенного телу движения едва ли рассматривалась Кеплером. Приписывать Кеплеру идею инерции, как это сделал Лейбниц, — значит способствовать путанице понятий, в особенности если говорить об инерции в связи с инерцией Декарта, которая первоначально представлялась как сохранение количества движения. «Инерцию Кеплера» можно вывести из более общей «картезиано-ньютоновской инерции» только в том случае, если покой и равномерное движение рассматривать как динамически эквивалентные и физически идентичные состояния, описываемые в различных системах отсчета. Но Кеплер был еще, конечно, далек от такой релятивистской трактовки. Именно такое смешение понятий побудило Огюста Конта назвать принцип инерции «законом Кеплера»²⁵.

Для того чтобы оценить в полном значении вклад Кеплера в развитие понятия инертной массы, важно сравнить концептуальную схему Кеплера с соответствующей схоластической схемой шестнадцатого столетия. Действительно, Вильям Альввик, Николай Орезмский, Буридан,

pondere (ut in libro de stella nova scripsi) hoc est, in quantum sunt praedita facultate renitendi motui intrinsecus illato pro mole corporis et densitate materiae.

²⁴ Johannes Kepler, Annotations to Aristotle's «De motu terrae» (см. гл. III, сноску 31).

²⁵ О. Конт, Курс положительной философии, т. I, СПб., 1900, стр. 228.

Альберт Саксонский и другие широко использовали ²⁶ такие понятия, как «склонность к покою», «склонность к неподвижности», «склонность к противоположности движения» в своих дискуссиях относительно небесных движений. Так как, однако, с их точки зрения, движущие силы позади небесных сфер оставались духовными, все их дискуссии не затрагивали «природных сил»; речь шла лишь о «волевых силах», не имеющих отношения к физическим законам. Соединив инерцию с количеством материи, Кеплер превратил метафизическое понятие неактивности в нечто такое, что в его время могло рассматриваться как научное понятие.

²⁶ Ср. Anneliese Maier, *Zwischen Philosophie und Mechanik* (Storia e Letteratura, Rome, 1958), S. 189—236.