

Это рассуждение неполно, и может привести к неправильному результату. Из рассуждения выпало третье тело — нить, которая также движется ускоренно. Тела A и B не взаимодействуют непосредственно между собой. Они взаимодействуют с *нитью*, и третий закон Ньютона надо применять именно к таким взаимодействиям. Вот более подробное рассуждение, в котором учитывается ускорение, сообщаемое нити. В нем под F_1 и F_2 следует понимать силы, с которыми на тела A и B действует *натянутая нить*. Силы, с которыми на нить действуют тела A и B , обозначим F'_1 и F'_2 . К уравнениям (12.4) надо присоединить уравнение движения нити: $ma = F'_1 - F'_2$, где m — масса нити. Ввиду равенства действия и противодействия $F'_1 = F_1$, $F'_2 = F_2$, так что

$$ma = F_1 - F_2.$$

Решая это уравнение совместно с (12.4), получим

$$a = \frac{F}{m_A + m_B + m},$$

$$F_2 = m_B a, \quad F_1 = (m_B + m) a.$$

Теперь $F_1 \neq F_2$, поскольку $m \neq 0$. Допустим, однако, что масса нити пренебрежимо мала по сравнению с массами тел A и B . Тогда отбрасывая член ma , получим приближенно $F_1 = F_2$. В этом приближении результат получается такой же, как если бы тела A и B *непосредственно* взаимодействовали между собой. Идеализируя задачу, говорят, что взаимодействие между телами A и B осуществляется посредством «*безмассового*» тела (нити). Подобные случаи встречаются очень часто. Безмассовые тела просто выбрасывают из рассмотрения. Однако безмассовых тел в действительности не существует, они являются идеализированными абстракциями. Надо отдавать себе отчет, когда можно и когда нельзя пользоваться такими идеализированными абстракциями. В приведенном примере было бы грубой ошибкой пользоваться соотношением $F_1 = F_2$ в тех случаях, когда масса нити сравнима с массами тел A и B .

§ 13. Взаимодействие на расстоянии и полевое взаимодействие

1. Взаимодействие тел может происходить либо при их *непосредственном* соприкосновении, либо *на расстоянии*. В первом случае взаимодействующие тела тянут или толкают друг друга. Возникающие при этом силы обычно вызываются *деформациями тел*. Деформации могут быть малы и не представлять непосредственного интереса в изучаемом явлении. Тогда от них можно отвлечься, учтя их влияние введением соответствующих сил *натяжения* и *давления*. Но если нас интересует происхождение и механизм действия сил, то надо подробно рассмотреть картину деформаций,

возникающих в телах. Так, в примере, рассмотренном в конце предыдущего параграфа, нить действует на тела A и B (см. рис. 23) потому, что она растянута. В приведенных там расчетах мы отвлеклись от этого обстоятельства, так как предполагали, что растяжение нити мало, так что скорости связанных тел A и B можно было считать одинаковыми. В этом случае результаты расчета не зависят от степени растяжения нити. Это было бы, вообще говоря, не так, если вместо нити взять мягкую пружину. Мы не можем также отвлечься от растяжения нити, если хотим понять происхождение сил F_1 и F_2 , с которыми нить действует на тела A и B . Точно так же надо рассмотреть деформации тел A и B , если мы хотим понять, почему эти тела растягивают нить. Ведь тела A и B действуют на нить только потому, что они деформированы. Камень, привязанный на веревке, заставляют вращаться по окружности. При этом неизбежно возникнут деформации. Если бы камень не был деформирован, то он не мог бы двигаться с ускорением. Всякая мысленно вырезанная малая часть камня движется с ускорением потому, что на нее действуют окружающие части камня. А это возможно только тогда, когда камень деформирован.

Помимо сил, зависящих от деформации тел, возможны и более сложные случаи. Например, силы взаимодействия могут зависеть не только от величины деформаций, но и от *скоростей деформаций*. Примером могут служить силы трения. Но и эти силы возникают лишь при непосредственном соприкосновении взаимодействующих тел. Во всех этих случаях говорят, что силы взаимодействия являются *силами близкого действия*.

2. Помимо сил, развивающихся при соприкосновении тел, в природе существуют силы, которые, во всяком случае при непосредственном созерцании, воспринимаются нами как силы, *непосредственно действующие на расстоянии* без какого бы то ни было участия промежуточной среды. Они существуют даже тогда, когда взаимодействующие тела разделены «пустым» пространством. К силам такого рода относятся, например, гравитационные силы, а также силы взаимодействия наэлектризованных и намагниченных тел.

Согласно основным представлениям механики Ньютона силы, действующие на всякое тело в какой-либо момент времени, зависят от положений и скоростей остальных тел в тот же момент времени. Когда взаимодействующие тела не соприкасаются, такое представление предполагает либо непосредственное действие на расстоянии, либо передачу взаимодействий с *бесконечно большой скоростью*. Ньютоновская механика принципиально допускала взаимодействия, передающиеся с бесконечно большими скоростями. Логически против такого допущения возразить ничего нельзя. Вопрос должен быть решен опытом. Опытные факты привели к заключению, что мгновенных взаимодействий не существует. Скорость распространения взаимодействий ограничена (она не превосходит скорости

света в вакууме). Отсюда следует, что описание взаимодействий, даваемое ньютоновской механикой, может привести и действительно приводит к практически верным результатам только тогда, когда скорости всех тел рассматриваемой системы пренебрежимо малы по сравнению со скоростью распространения взаимодействий (скоростью света). Но принципиально такое описание неверно. Для иллюстрации рассмотрим третий закон Ньютона. Из-за наличия конечной скорости распространения взаимодействий этот закон не может быть всегда верным для взаимодействий, осуществляющихся на расстоянии. Действительно, пусть две материальные точки длительно находятся в покое в положениях A и B (рис. 24). Допустим, что силы их взаимодействия в этих положениях подчиняются третьему закону Ньютона. Если первая точка перейдет в новое положение A' настолько быстро, что за время перехода взаимодействие не успеет распространиться до точки B , то сила F при этом не изменится. Она будет определяться не новым, а прежним расположением материальных точек, т. е. будет направлена вдоль прямой BA , а не вдоль прямой BA' , как должно было бы быть по третьему закону Ньютона. Получилось нарушение третьего закона, а с ним и механического закона сохранения импульса. Суммарный импульс тел A и B , вообще говоря, не может сохраняться из-за конечности скорости распространения взаимодействий.

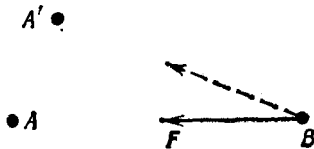


Рис. 24.

3. Физик XIX века сказал бы, что такое нарушение третьего закона Ньютона и механического закона сохранения импульса является кажущимся. В действительности нет непосредственного действия тел на расстоянии. Непосредственное действие на расстоянии предполагает, что тело может оказывать действие в тех местах, где оно не находится и от которых оно отделено пустым пространством. По этой причине такое действие невозможно. Все взаимодействия осуществляются посредством промежуточной среды. Тело A , действуя на окружающую среду, вызывает в ней какие-то изменения, например, напряжения и давления, распространяющиеся с конечными скоростями. Когда эти изменения доходят до тела B , они проявляются в виде сил, действующих на него. Но как быть в тех случаях, когда взаимодействующие тела отделены друг от друга совершенно пустым пространством? На это физик XIX века отвечал бы, что абсолютно пустого пространства не существует. Все пространство заполнено какой-то средой, например *мировым эфиром*, через которую и осуществляются взаимодействия. Такую гипотетическую среду физик XIX века наделял свойствами, аналогичными свойствам привычных нам твердых, жидких или газообразных тел. Третий закон Ньютона всегда справедлив — сказал

бы он, — но его надо применять не к силам взаимодействия непосредственно между удаленными телами A и B (таких сил просто не существует, они кажущиеся), а к силам взаимодействия между этими телами и окружающей средой. Закон сохранения импульса также всегда справедлив. Однако полный импульс складывается не только из импульсов тел, входящих в систему, но и из импульса промежуточной среды, через которую передаются взаимодействия.

Физик нашего времени рассуждает аналогично, но более осторожно и абстрактно. Он также не признает непосредственного действия тел на расстоянии. Однако он не признает и промежуточной среды, через которую якобы передаются взаимодействия. Он говорит, что все взаимодействия осуществляются *полями* — гравитационными, электромагнитными и прочими. Тело A возбуждает в окружающем пространстве *силовое поле*, которое в месте нахождения тела B проявляется в виде действующих на него сил. В свою очередь тело B возбуждает аналогичное силовое поле, действующее на тело A . Никаких других силовых взаимодействий, помимо полевых, современная физика не признает. Взаимодействия прикосновением являются частными случаями полевого взаимодействия. Они осуществляются *молекулярными полями*. Молекулярные поля быстро убывают с расстоянием и проявляются, когда расстояние между взаимодействующими телами не превышает примерно 10^{-7} см. Вот почему такие *полевые взаимодействия* макроскопически воспринимаются как «*взаимодействия прикосновением*».

4. Возникает вопрос, не является ли различие между точками зрения современного физика и физика прошлого века чисто терминологическим: раньше говорили о промежуточной среде, теперь говорят о поле. Дело, конечно, не в терминологии, а в существе, в реальных физических свойствах поля и гипотетической среды — мирового эфира, посредством которой по воззрениям физиков XIX века осуществляются взаимодействия тел. Мировому эфиру приписывались свойства, аналогичные свойствам обычных тел. Можно было говорить о покое и движении эфира, о его упругости, плотности, силах, действующих на эфир. Можно было говорить о движении тел относительно эфира, с эфиром можно было связать систему отсчета и т. д. О всем этом не имеет смысла говорить, когда речь идет о поле. На поле современная физика смотрит как на некоторую объективную реальность, посредством которой передаются взаимодействия. Поле может существовать и самостоятельно, независимо от возбудивших его тел. Таковы, например, электромагнитные волны, излучаемые радиостанциями. Радиостанция может прекратить работу, а излученное ею электромагнитное поле продолжает существовать и распространяться в пространстве. Достигнув удаленного приемника, оно доставляет информацию, которую несколько ранее передала радиостанция. Нет абсолютно пустого пространства, оно заполнено полями. Поле, наряду с веществом,

является одним из видов материи. Физикам XIX века казалось, что понять природу сил взаимодействия — это значит свести их к механическим силам, возникающим при соприкосновении тел, например, к силам упругости. Современная физика отрицает такую постановку вопроса.

Упругие силы, силы давления и натяжения, мускульная сила и прочие силы издавна были привычны человеку. Он считал эти силы чем-то простым и понятным. Электрические и магнитные силы, с которыми он столкнулся позднее, были восприняты им как нечто таинственное и непонятное. Возникло естественное стремление свести эти таинственные силы к более простым и привычным силам упругости, к силам давления и натяжения. Однако в действительности дело обстоит как раз наоборот. Более простыми и «понятными» являются силы электромагнитных взаимодействий, а упругие и прочие силы — более сложными. По современным представлениям силы упругости, силы трения, силы химического сродства, молекулярные силы, мускульная сила и прочие обычные силы, с которыми сталкивается человек, за исключением сил всемирного тяготения, являются не чем иным, как проявлением электромагнитных сил. Поэтому задача сведения электромагнитных сил к силам упругости просто бессмысленна.

Поле действует на тела с определенными силами. Однако не имеет смысла говорить о механических силах, действующих на поля. Поэтому с точки зрения полевого взаимодействия третий закон Ньютона может нарушаться: на тело действует сила, но нет силы противодействия, действующей на другое тело. Закон сохранения импульса, однако, остается верным, так как импульсом могут обладать не только тела, но и поля. Импульс поля проявляется в изменении импульса тела, излучившего или поглотившего энергию поля. При излучении тело теряет импульс, уносимый полем, при поглощении оно приобретает импульс за счет поглощенной энергии поля.

5. Примером проявления импульса электромагнитного поля может служить *давление света*. Опытами П. Н. Лебедева (1866—1912) было показано, что свет оказывает давление на тела, на которые он падает. Рассмотрим изолированную систему из двух тел *A* и *B* (рис. 25). Пусть тело *A* излучило кратковременный световой сигнал по направлению к телу *B*. Дойдя до тела *B*, свет поглощается, оказывая на него давление. В результате тело *B* приходит в движение, его импульс меняется. Закон сохранения импульса, очевидно, был бы нарушен, если бы свет, направлявшийся к телу *B*, не обладал импульсом. Мы должны приписать ему импульс, величина которого равна импульсу, приобретенному телом *B* после

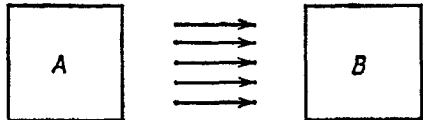


Рис. 25.

поглощения света. Но если свет обладает импульсом, то при его излучении излучающее тело A должно испытывать *отдачу*. Иначе процесс излучения света сопровождался бы нарушением закона сохранения импульса.

Эти рассуждения можно облечь в количественную форму и прийти к важным соотношениям. Допустим, что на полностью поглощающее тело B нормально к его поверхности падает параллельный пучок света. Опытами Лебедева было показано, что давление π , оказываемое светом на единицу площади тела B , равно объемной плотности энергии падающего пучка. Обозначим l длину, а S — площадь поперечного сечения падающего пучка. Тогда $\pi = \frac{\varepsilon}{Sl}$, где ε — энергия пучка. Сила, действующая на тело B , равна $F = \pi S = \varepsilon/l$. Она действует в течение времени $\tau = l/c$ (c — скорость света в вакууме), сообщая телу импульс $p = F\tau = \varepsilon/c$ (см. § 18). Это и есть импульс света, поглощенного телом B . Итак, свет, распространяющийся в определенном направлении, обладает импульсом

$$p = \frac{\varepsilon}{c}. \quad (13.1)$$

Поскольку распространение идет со скоростью c , целесообразно представить импульс в виде $p = mc$, рассматривая величину m как *массу света*. Она равна

$$m = \frac{\varepsilon}{c^2}. \quad (13.2)$$

Соотношение (13.2) получено здесь для энергии света. Теория относительности показала, что оно справедливо для любых видов энергии. В таком расширенном понимании соотношение (13.2) выражает фундаментальный закон Эйнштейна о *взаимосвязи между массой и энергией*.

6. В механике нам не придется сталкиваться с явлениями, в которых проявляются импульсы полей. Мы ограничимся изучением только таких явлений, для которых третий закон Ньютона и закон сохранения импульса в их старом — ньютоновском — смысле выполняются.

§ 14. Роль начальных условий

1. Векторное уравнение движения материальной точки (11.3) можно записать в *координатной форме*:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = F_x, \quad m \frac{d^2y}{dt^2} = F_y, \quad m \frac{d^2z}{dt^2} = F_z. \quad (14.1)$$

Одно векторное уравнение (11.3) эквивалентно трем числовым уравнениям (14.1). Все эти уравнения являются *дифференциальными*, а потому их недостаточно для однозначного определения движения