

История и методология механики

Лекция № 13

Евгений Алексеевич Зайцев

e_zaitsev@mail.ru

План лекции

Тема. 1

Роль явления удара в картезианской физике

Тема. 2

Конкурс Лондонского Королевского общества по теории удара.

Тема 3.

Спор о мере движения

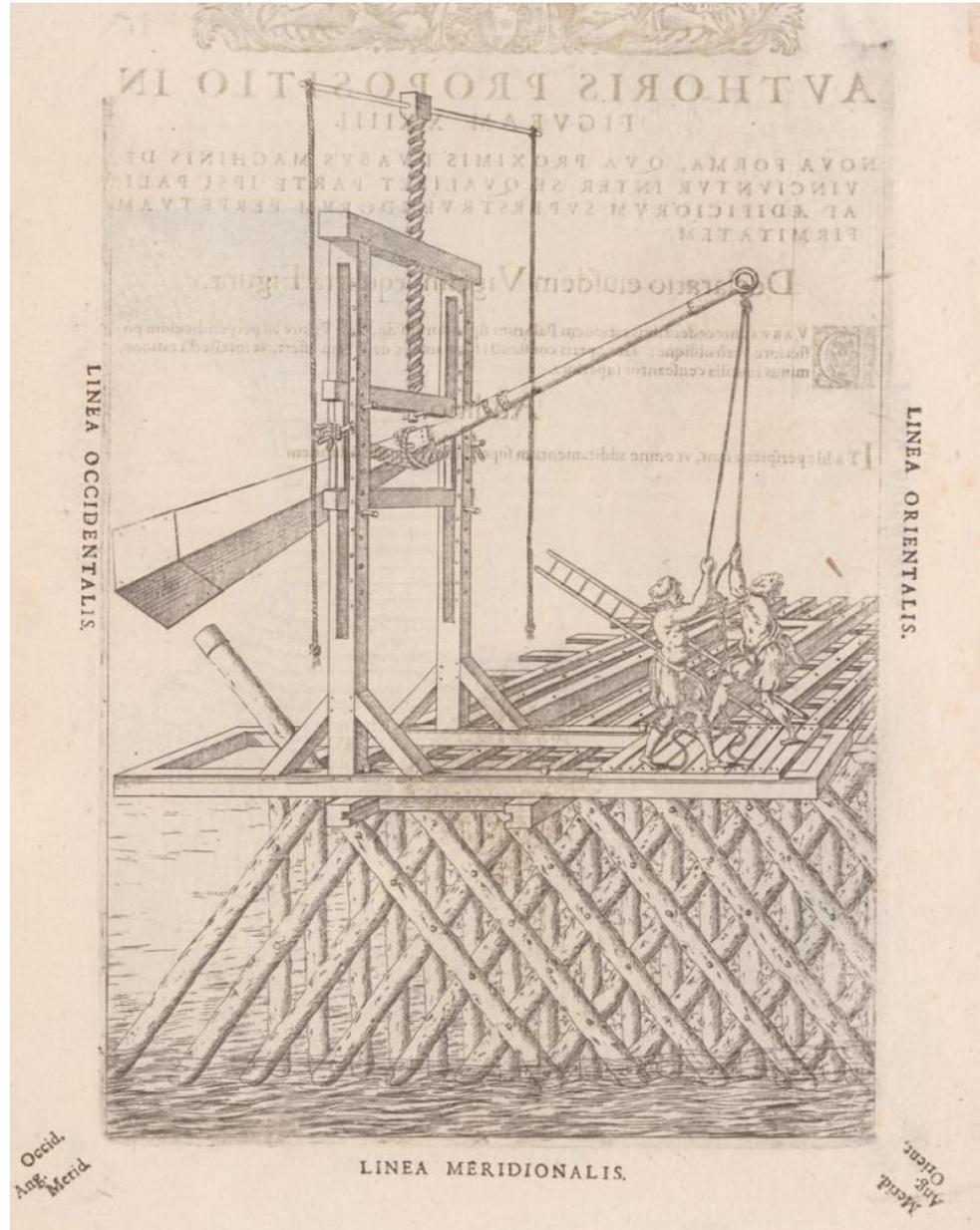
Тема. 1

Роль явления удара в картезианской физике

1. Предыстория. Галилей: задача о силе удара. «Беседы и математические доказательства» (1638). День 6-ой.
2. Й.М. Марци, «О пропорциях движения» (1639)
3. Теория удара в физике Декарта.

Технический источник задачи Галилея об ударе.

Копер для забивки свай под углом. J. Besson, Theatrum instrumentorum (1582)



Технический источник задачи Галилея об ударе – копер для забивки свай

Рисунок из трактата Бонаюто Лорини «О фортификациях» (1596)

Основной вывод из практики:

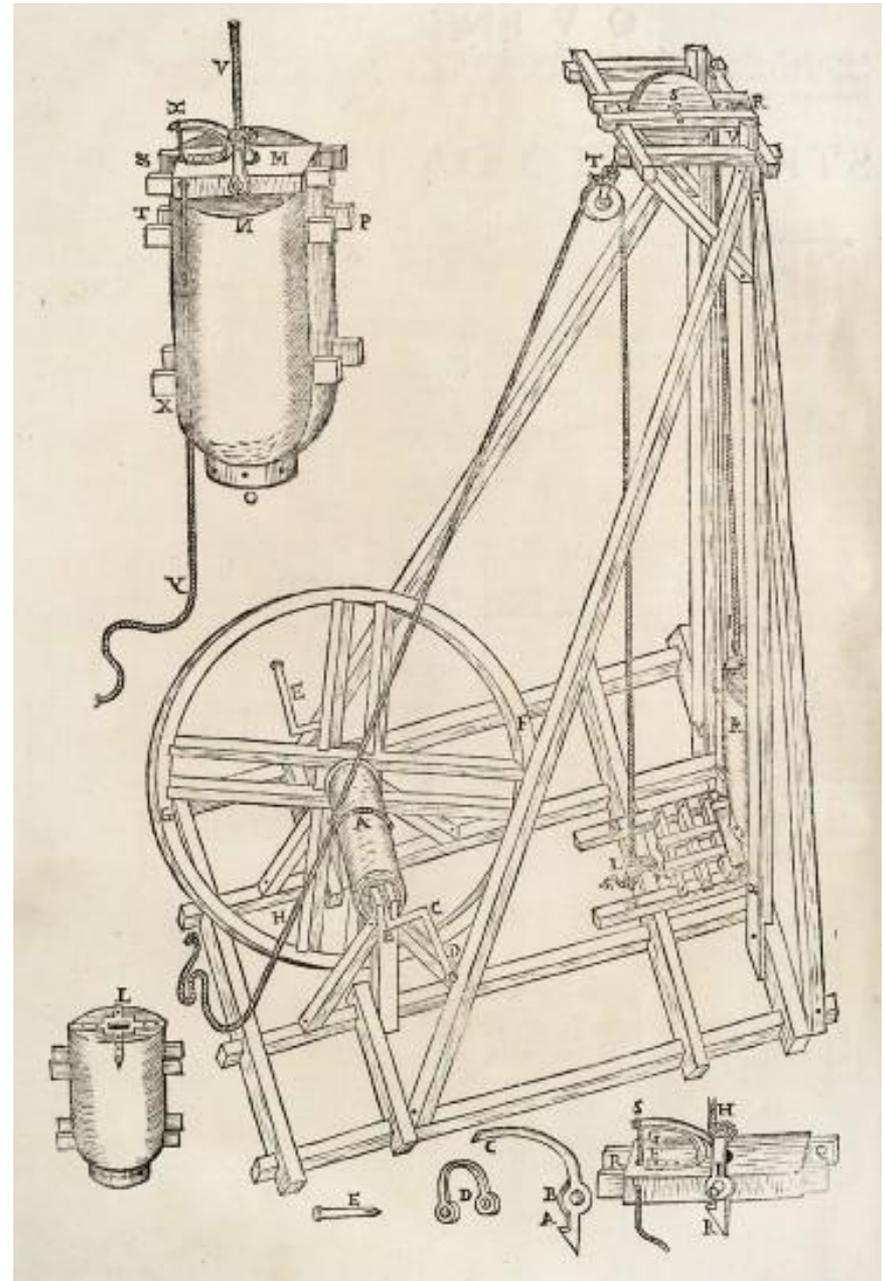
Эффект от удара тяжелым телом значительно превосходит эффект от действия того же тела, находящегося в покое (когда «баба» копра просто кладется на сваю, а молоток – на гвоздь).

В первом случае тело действует «живой силой», во втором – «мертвой».

Теоретическая проблема:

Установить количественное соотношение между действием «живой» и «мертвой» силы.

Галилей использовал термины «ударяющий груз» и «мертвый груз».



Галилей, «Беседы и математические доказательства» (1638). День шестой.

Теория удара

Основное предложение (теорема)

Пусть действие, производимое ударом одного и того же груза (P), падающего всегда с одинаковой высоты, выражается в перемещении на одно и то же расстояние некоторого тела A , воспринимающего удар и обладающего постоянным сопротивлением. Пусть для получения того же результата необходим *мертвый груз* определенной величины (Q), действующий на тело A одним давлением без удара.

Утверждение:

Тот же *ударяющий груз* P , встретив при падении другое тело B , обладающее бóльшим сопротивлением, переместит его на расстояние, скажем, вдвое меньшее, чем в первом случае, если для получения подробного же результата недостаточно давления первого мертвого груза Q и требуется груз, вдвое больший, т.е. $2Q$.

Теория удара

Основное предложение (продолжение)

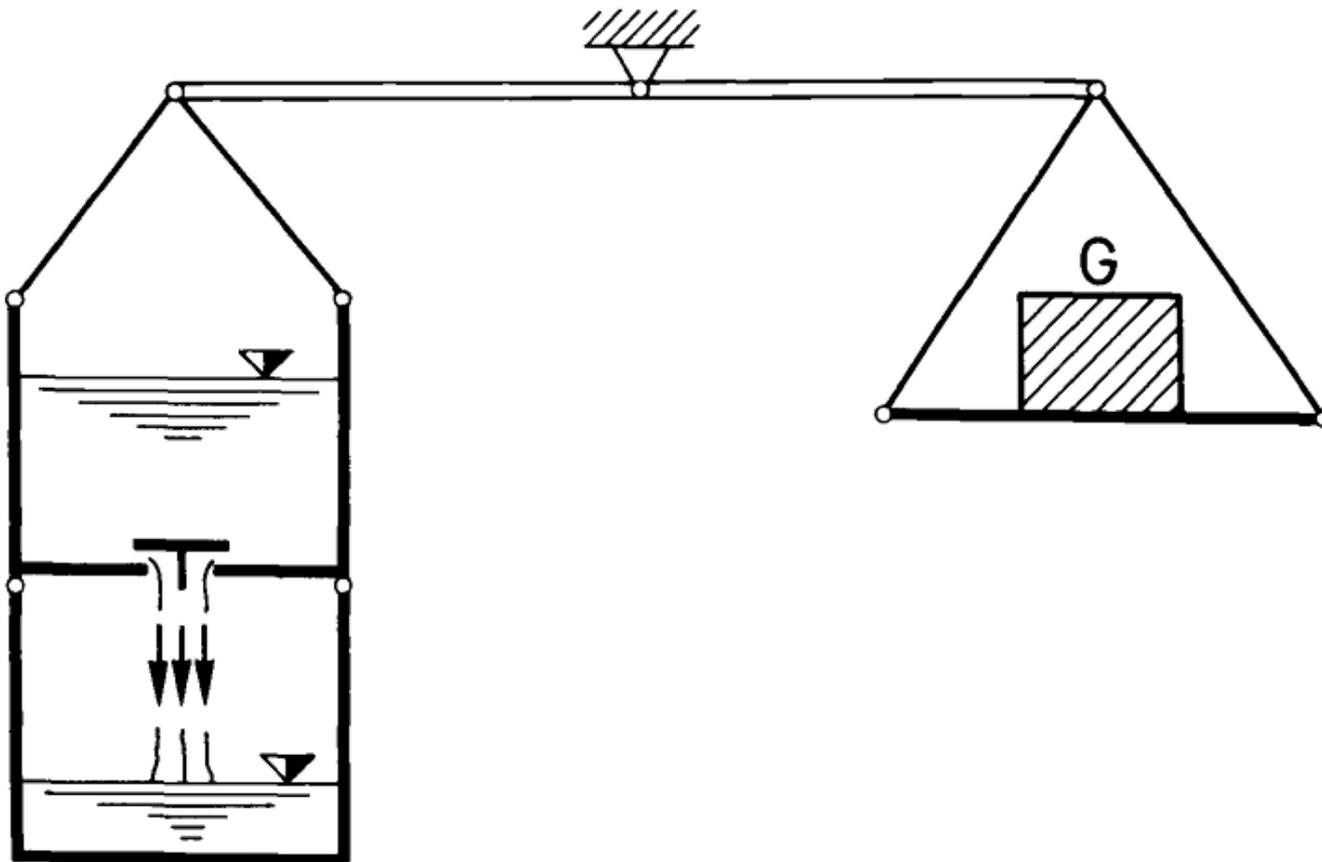
Обобщение:

То же самое будет иметь место и при всяких других соотношениях: перемещение производимое силою одного и того же удара, будет тем меньше, чем больше будет требуемый *мертвый груз* по сравнению с первоначальным».

Начало доказательства:

«Предположим, что сопротивление какого-либо тела, например *сваи* (!), таково, что преодолеть его может *мертвый груз*, весом не менее 100 фунтов, и положим, что вес ударяющего тела составляет всего 10 фунтов, причем это тело, падая с высоты, скажем, 4 локтей, вбивает сваю на 4 дюйма...»

Прибор Галилея для определения силы удара падающей жидкости



Йоханнес Маркус Марци (Johannes Marcus Marci) (1595—1667)



- Работал в Пражском университете (с 1630 г., с 1662 г. ректор).
- Физические исследования посвящены механике и оптике.
- В трактате «О пропорции движения» (*De proportione motus*, 1639) развил теорию соударения твердых шаров и показал различие между упругими и неупругими столкновениями.
- В 1648 г. открыл дисперсию света и впервые высказал идею о волновой природе света. Объяснил радугу и окрашенность тонких плёнок. Работы Марци долгое время были мало известны.
- Исследования Марци относятся также к математике и медицине. За научные труды получил дворянский титул.

Й.М. Марци (1595-1667)

- В трактате **«О пропорции движения» (1639)** Марци пришел независимо от Галилея к результатам, сходным с выводами «Бесед» Галилея (в вопросах движения с ускорением тяжелых тел).
- Опираясь на эксперименты, Марци излагает ряд правильных законов соударения тел, которые он называет **«твердыми»**, по-видимому, имея в виду тот случай удара, который позже стали называть **упругим ударом (без остаточной деформации соударяющихся тел)**.
- Рассматривал центральный удар шаров, движущихся по горизонтальной прямой.

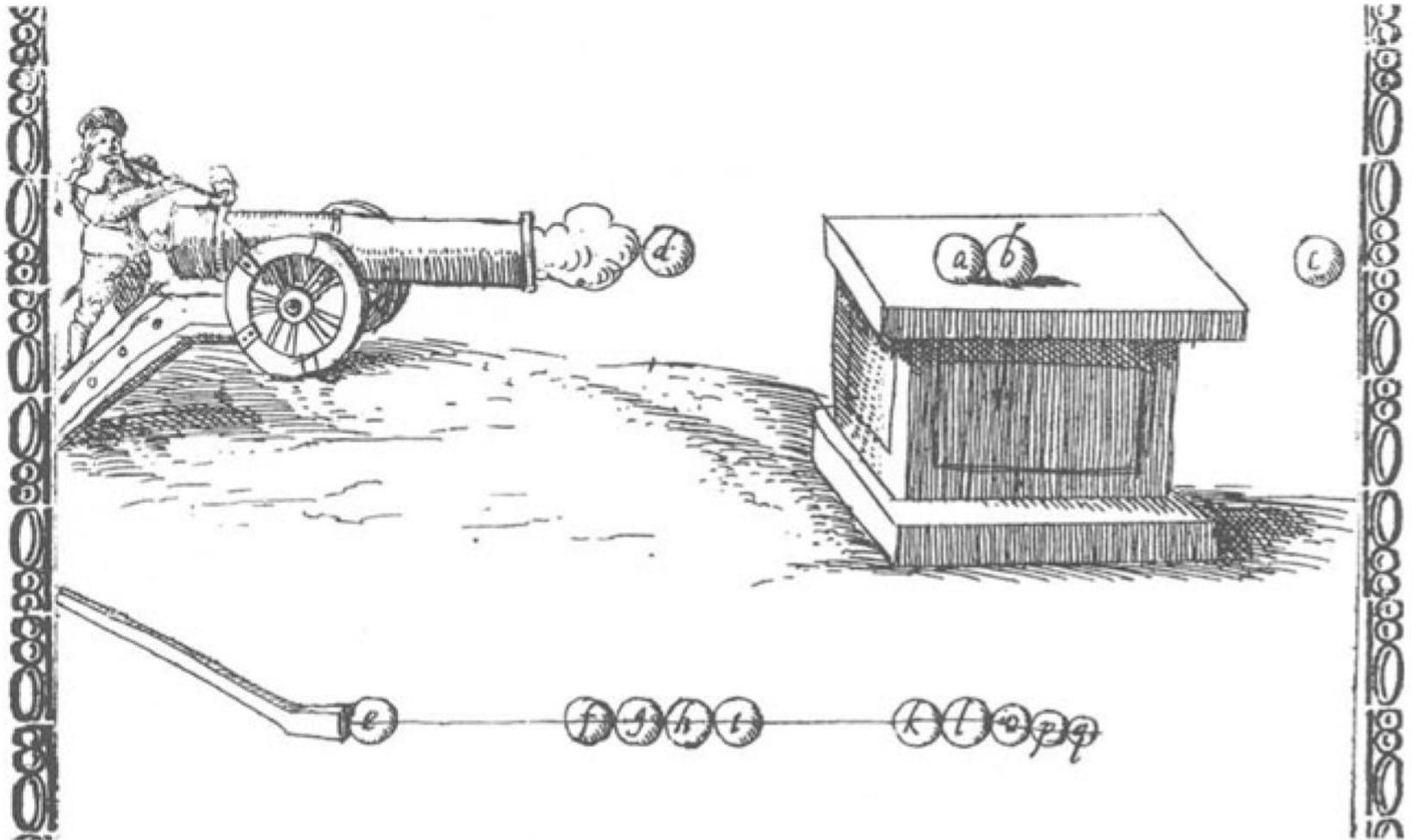
Й.М. Марци
Законы удара (некоторые примеры)

- Два равных твердых тела, двигавшиеся друг другу навстречу с равными скоростями, взаимно отражаются с теми же скоростями.
- Два равных тела, одно из которых покоится, а другое ударяет его, двигаясь с некоторой скоростью, обмениваются после удара скоростями: ударившее тело останавливается, а ударенное тело приобретает всю скорость ударившего тела.
- Если два равных соприкасающихся покоящихся тела будут ударены третьим таким же телом в направлении линии центров, то среднее тело останется в покое, ударившее тело остановится, а крайнее тело получит скорость ударившего тела.

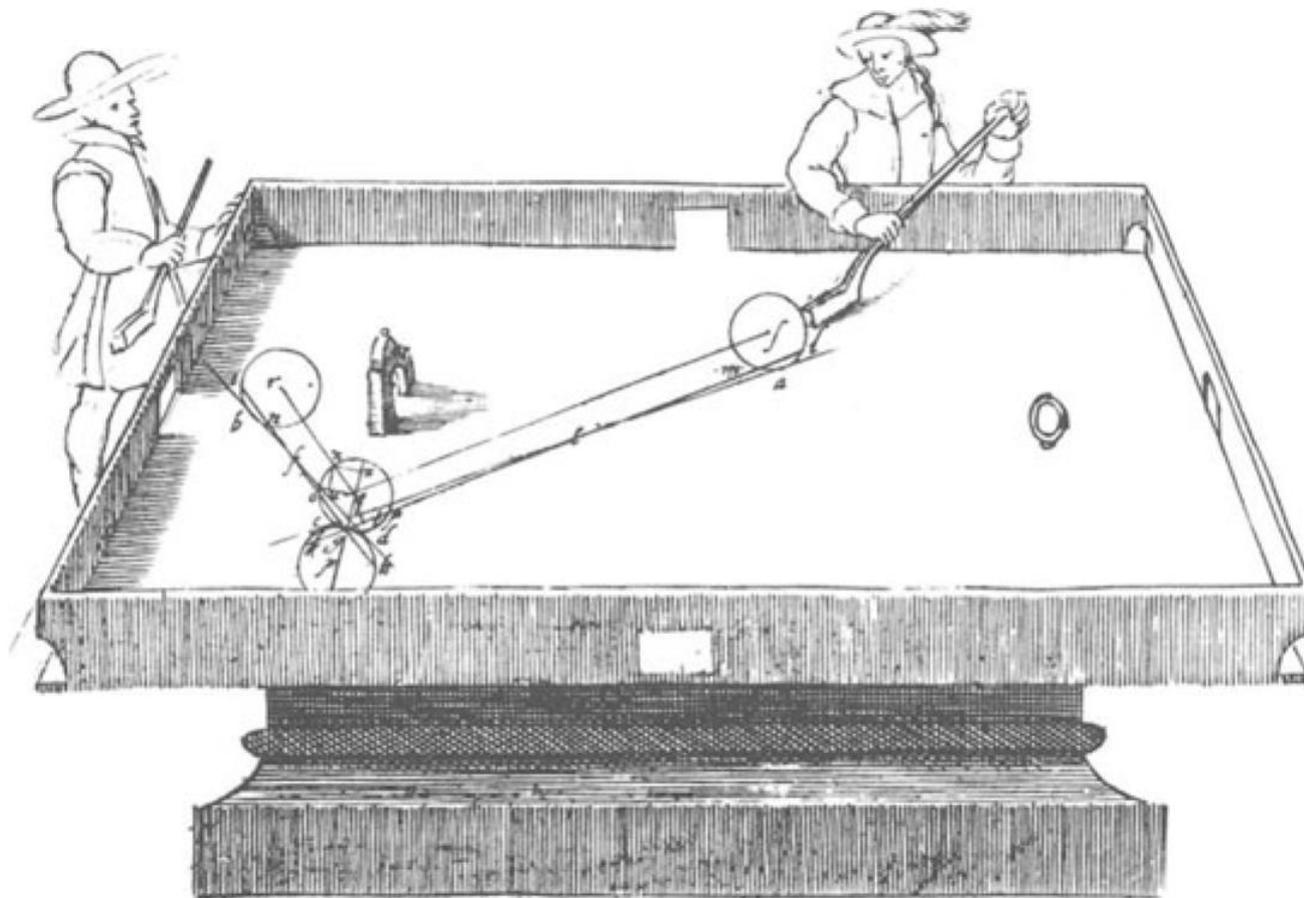
Johannes Marcus Marci, De proportione motus (Prague, 1639)

Стрельба ядрами из пушки и игра в бильярд.

Рисунок из книги

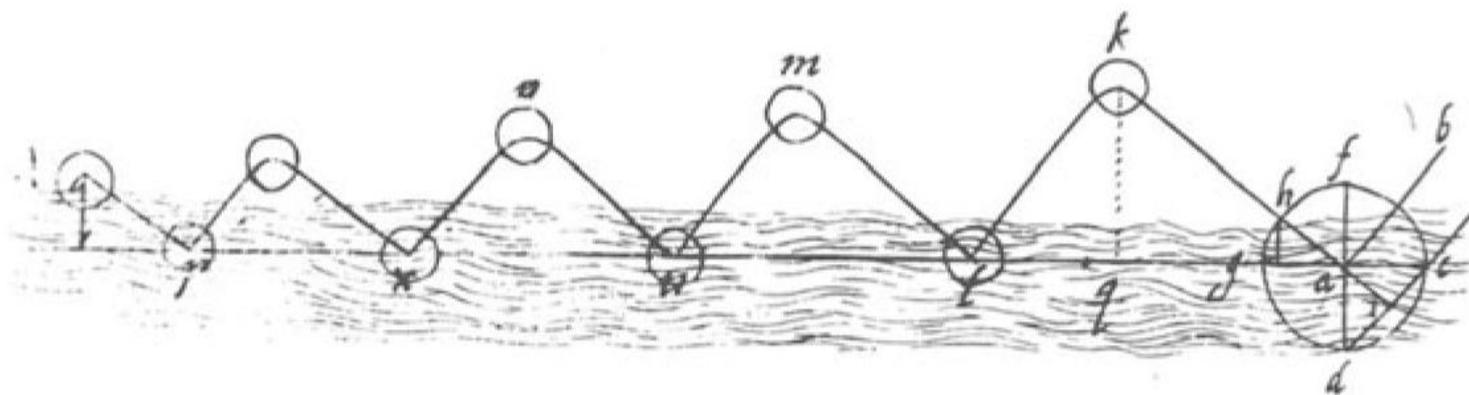


Johannes Marcus Marci, De proportione motus (Prague, 1639)
(рисунок из книги)



Объяснение отскоков брошенной гальки от поверхности воды
с помощью закона отражения

Рисунок из книги De proportione motus (Prague, 1639)



Рене Декарт (1596-1650)
Портрет кисти Ф. Хальса (1648)



Декарт (1596-1650). Основные произведения

Философские произведения

- «Правила для руководства ума» (1701).
- «Разыскание истины посредством естественного света» (1701).
- «**Мир, или Трактат о свете**» (написан 1630-34, издан 1664).
- «Рассуждение о методе, чтобы верно направлять свой разум и отыскивать истину в науках» (1637).
- «**Первоначала философии**» (1644).
- «Описание человеческого тела. Об образовании животного» (1664).
- «Размышления о первой философии, в коих доказывается существование Бога и различие между человеческой душой и телом» (1641).
- Переписка.

Естественнонаучные произведения

- «Диоптрика» (1637)
- «Метеоры» (1637)
- «Геометрия» (1637)

Принцип инерции у Декарта. Трактат «О мире» (гл. 7)

Декарт о гипотетическом характере законов природы (гл. 6):

«Поскольку я могу отчетливо представить себе, что я полагаю в этот придуманный мир, то, хотя бы и не было ничего такого в старом мире, Бог все же может создать это в новом; ибо несомненно, что он может создать все, что мы способны вообразить».

Первое правило (О покое и продолжении движения)

1. «Первое правило заключается в следующем: каждая частица материи в отдельности продолжает находиться в одном и том же состоянии до тех пор, пока столкновение с другими частицами не вынуждает ее изменить это состояние. Иными словами, если частица имеет некоторую величину, она никогда не станет меньшей, пока ее не разделят другие частицы; если эта частица круглая или четырехугольная, она никогда не изменит этой фигуры, не будучи вынуждена к тому другими;

если она остановилась на каком-нибудь месте, она никогда не двинется отсюда, пока другие ее не вытолкнут;

и раз уж она начала двигаться, то будет продолжать это движение постоянно с равной силой до тех пор, пока другие ее не остановят или не замедлят ее движения».

«О мире» гл. 7 «О законах природы этого нового мира».

Принцип инерции у Декарта.

Третье правило (прямолинейность инерциального движения)

«В качестве третьего правила я прибавлю, что, хотя при движении тела его путь чаще всего представляется в виде кривой линии и хотя невозможно произвести, как уже было сказано, ни одного движения, которое не было бы так или иначе круговым, тем не менее каждая из частиц тела в отдельности всегда стремится продолжать его *по прямой линии*. И таким образом, их действие, т. е. то, как они *склонны* двигаться, отличается от их движения.

Например, если заставить колесо вращаться вокруг своей оси, то, хотя все его части будут двигаться по кругу, так как, будучи соединены друг с другом, они не могут перемещаться иначе, склонны они передвигаться не по кругу, а *по прямой*. Это ясно видно, если какая-нибудь из частей случайно отрывается от других. Как только она окажется на свободе, она прекращает свое круговое движение и движется по прямой линии».

(«О мире», гл. 7).

Третье правило Декарта (продолжение)

«То же самое происходит и при вращении камня в праще. Выскочив из пращи, камень летит совершенно прямо, но и, находясь в ней, он все время давит на середину пращи и натягивает веревку. Это со всей ясностью доказывает, что камень постоянно имеет склонность двигаться по *прямой линии* и что по кругу он идет только по принуждению.

Это правило ... обусловлено лишь тем что Бог сохраняет каждую вещь посредством непрерывного действия и, следовательно, сохраняет ее не такой, какой она, возможно, была некоторое время назад, а точно такой, какова она в тот самый момент, когда он ее сохраняет. Из всех движений одно только движение по прямой совершенно просто, и для понимания его природы достаточно рассмотреть один момент. Ибо для того, чтобы представить его, достаточно помыслить, что некоторое тело совершает действие движения в определенную сторону, что бывает в каждый из моментов, которые могут быть определены в течение того времени, когда оно движется. Напротив, для того чтобы представить круговое или какое-нибудь другое возможное движение, необходимо рассмотреть по крайней мере два таких момента, или, лучше, две его части, и существующее между ними отношение».

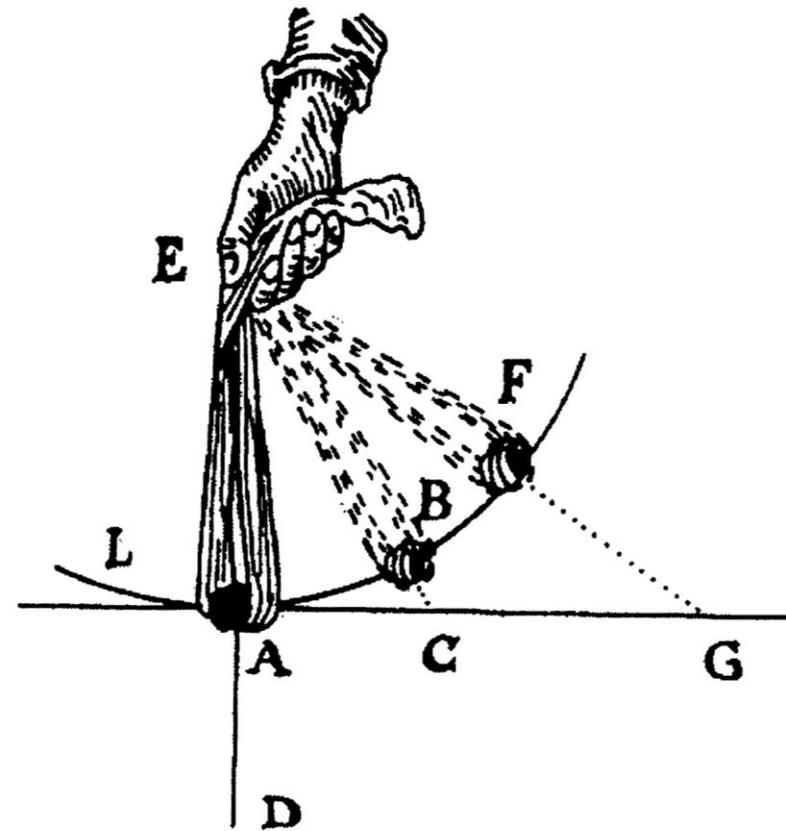
(«О мире», гл. 7).

Прямолинейная инерция. Вращение камня в праще («О мире», гл. 7).

«Так, например, если камень движется в праще, следуя по кругу, обозначенному AB , и вы рассматриваете его в тот момент, когда он достигает точки A , то вы легко найдете, что он находится в состоянии движения (ибо он здесь не останавливается), а именно в состоянии движения к точке C (ибо как раз туда направлено это движение в настоящий момент).

Однако вы не сможете найти здесь ничего указывающего на то, что движение камня круговое. Если же предположить, что как раз здесь начался полет камня, выскочившего из пращи, и что Бог сохраняет его таким, каков он есть в этот момент, то совершенно ясно, что Бог сохранит в нем не склонность двигаться по кругу, следуя по линии AB , а склонность двигаться совершенно прямо к точке C .

Следовательно, исходя из этого правила, надо сказать, что Бог — единственный творец всех существующих в мире движений, поскольку они вообще существуют и поскольку они прямолинейны». («О мире», 7)



Принцип инерции Декарта («Первоначала философии»)

«Первый закон природы: всякая вещь пребывает в том состоянии, в каком она находится, пока ее что-либо не изменит. Из того, что Бог не подвержен изменениям и постоянно действует одинаковым образом, мы можем также вывести некоторые правила, которые я называю законами природы ...

Первое из этих правил таково: всякая вещь в частности продолжает по возможности пребывать в одном и том же состоянии и изменяет его не иначе как от встречи с другими. ...

У нас нет никаких оснований полагать, что, начав двигаться, она когда-либо прекратит это движение, если только не встретится что-либо замедляющее или останавливающее его.

Отсюда должно заключить, что тело, раз начав двигаться, продолжает это движение и никогда само собою не останавливается.

«Первоначала философии» II, 37.

Принцип инерции Декарта («Первоначала философии»)

«Но так как мы обитаем на Земле, устройство которой таково, что все движения, происходящие вблизи нас, быстро прекращаются, притом часто по причинам, скрытым от наших чувств, то мы с юных лет судим, будто эти движения, прекращающиеся по неизвестным нам причинам, прекращаются сами собой; мы и впоследствии весьма склонны полагать то же обо всех движениях в мире, а именно что движения естественно прекращаются сами собой, т. е. **стремятся к покою**

Однако это только ложное представление, явно противоречащее законам природы, ибо покой противоположен движению, а ничто по влечению собственной природы не может стремиться к своей противоположности, т. е. к разрушению самого себя».

«Первоначала философии» II, 37.

Правила Декарта соударения твердых тел Рене Декарт, «Первоначала философии» (1644). Часть II

Из трех «законов природы» Декарт выводит 7 правил соударения тел (почти все неверные с современной точки зрения).

Примеры правил Декарта

Правило 2.

«Если тело B несколько больше тела C , и они столкнутся на одинаковой скорости, то назад обратится только C , и оба они будут продолжать движение в эту сторону, ибо B , обладая большей силой, чем C , не может быть вынуждено C следовать в обратном направлении».

Правило 3.

«Если тела равновелики, но B обладает несколько большей скоростью, чем C , то после их столкновения не только C обратится вспять и оба тела будут продолжать движение в ту сторону, откуда пришло C , ... но и от B к C с необходимостью перейдет половина той скорости, на которую B превосходит C ».

Правила соударений Декарта Вопрос об их выполнении в реальном мире

«Все эти доказательства настолько достоверны, что хотя бы опыт и показал обратное, однако мы вынуждены придавать нашему разуму больше веры, нежели нашим чувствам».

«Действительно, часто бывает так, что опыт на первый взгляд как будто противоречит изложенным правилам. Однако причина тому очевидна, ибо правила эти предполагают, что оба тела B и C , совершенно тверды и настолько отделены одно от другого, что вокруг их нет никакого вещества, которое могло бы способствовать или препятствовать их движению, а таких тел мы в нашем мире не усматриваем».

Правила соударений Декарта Критическая оценка (Ж.-Э. Монтюкла)

«Хотелось бы и здесь воздать почести Декарту, который нам особенно дорог как соотечественник, и сказать нечто похвальное о тех правилах, которые он пытался установить для передачи движения.

Увы, в этом случае абсолютная уверенность в своих метафизических идеях и неверно выбранное направление систематизирующей мысли привели Декарта к множеству ошибок, которые трудно простить.

На деле в этих правилах мы находим недочеты всякого рода, необоснованные принципы, противоречия, отсутствие связей и сопоставлений.

Короче говоря, это – череда ошибок, которые едва ли стоило обсуждать, если бы не уважение к славе их автора...

Несмотря на это уважение, мы все-таки рискнем высказаться напрямую: в данном случае речь идет о жалком позорище....»

Jean-Étienne Montucla "*Histoire des mathématiques*" (t. 1-4; 1799-1802)

Тема. 2

Конкурс Лондонского Королевского общества по теории удара.

Теория удара. Конкурс Лондонского королевского общества

В 1668 г. Лондонское Королевское общество объявило конкурс на лучшее исследование по теории соударения тел.

На конкурс свои сочинения представили англичанине:

Кристофер Рен (Christopher Wren, 1632-1723) и
Джон Валлис (John Wallis, 1616-1703),

и голландец – Христиан Гюйгенс (1629-1695).

Валлис исследовал удар как неупругих, так и упругих тел,
а Рен и Гюйгенс – только упругих.

Джон Валлис (John Wallis, 1616-1703)



Джон Валлис (John Wallis, 1616-1703)

Джон Валлис (Уоллис) — выпускник Кембриджского университета, профессор геометрии Оксфордского университета, один из первых членов Лондонского королевского общества — основательно изучил работы (многие перевел и издал) античных ученых, а также Торричелли, Кавальери, Декарта, был первым английским математиком, начавшим заниматься анализом бесконечно малых.

В «Арифметике бесконечных» (1656), сыгравшей важную роль в предыстории интегрального исчисления, Валлис, независимо от Ферма и Роберваля, фактически вычислил определенные интегралы от степеней с любыми рациональными показателями и некоторых других алгебраических функций.

В «Трактате о конических сечениях» (1656) Валлис показывает преимущества аналитического метода Декарта. В более поздних трактатах Валлис построил график функции $y = \sin x$, высказал идею геометрического представления комплексных чисел, ввел знак для бесконечности, понятия «интерполяция», «мантисса», «непрерывная дробь», занимался приближенными вычислениями, логарифмами, биномом Ньютона, методом бесконечно малых.

Высокий авторитет Валлиса в среде английских ученых XVII в. повлиял на формирование научных интересов И. Барроу и И. Ньютона.

Джон Валлис. Правила неупругих соударений (примеры)

Трактат «Механика или о движении» (в 3-х томах, 1669-1771).

Основное понятие – «*момент*» движущегося тела: произведение веса тела на его скорость – pv .

Гл. XI, предложение II

«Если тело, находящееся в движении, сталкивается с телом, находящимся в покое ..., то после удара оба тела будут двигаться вместе со скоростью, определяемой следующей формулой:

Следует поделить *момент* тела, которое двигалось, на вес двух тел, взятых вместе. Это и будет их общая скорость после удара. В самом деле, пусть тело A движется вдоль линии AA , проходящей через его центр тяжести и через центр тяжести покоящегося тела B . Пусть p и v — вес и скорость A . Сила толчка (*vis impellens*) будет равна pv . Пусть p' — вес тела B , скорость которого равна нулю. Вес двух тел вместе равен $p + p'$. После удара оба тела будут двигаться с одинаковой скоростью. В самом деле, B не может двигаться медленнее, чем A , так как A следует за ним. Не может оно двигаться и быстрее, так как предполагается, что нет никакой другой причины движения, кроме той, которая возникает из-за толчка со стороны A . Следовательно, груз весом $p + p'$ движется под действием силы pv и его скорость равна $\frac{pv}{(p + p')}$ ».

Правила неупругих соударений Валлиса (примеры)

1. Далее Валлис обобщает рассуждение на случай, когда тело В движется в том же направлении, что и тело А, но с меньшей скоростью. Пусть скорость В равна v' .

Тогда общая скорость двух тел равна $\frac{pv + p'v'}{p + p'}$.

Сумма «моментов» делится на сумму весов.

2. Если же тела А и В двигаются навстречу, скорость тела В обозначается как $-v'$,

и общая скорость двух тел равна $\frac{pv - p'v'}{p + p'}$.

Разность «моментов» делится на сумму весов.

В гл. XIII Валлис исследует упругий удар.

Кристофер Рен (Christopher Wren, 1632-1723)

Рен, по существу, получил те же корректные результаты, что и Гюйгенс (о нем ниже), но при этом проверил их на опыте.

При решении задачи об упругом ударе Рен вводит понятие «собственной скорости» тела. «Собственная скорость» тела – величина, обратно пропорциональная его весу.

В начале рассматривается соударение двух тел R и S , движущихся с *собственными скоростями*. В этом случае, после удара скорости тел сохраняются. Если же скорости отличны от их *собственных скоростей*, то тела R и S «приводятся в равновесие через столкновение».

Это означает, что если до столкновения скорость тела R была больше его собственной скорости на некоторую величину, а скорость S - меньше его собственной скорости на ту же величину, то в результате столкновения эта величина прибавляется к собственной скорости S и вычитается из собственной скорости R .

По-видимому, Рен рассматривал соударение двух тел, обладающих собственными скоростями, по аналогии с весами, балансирующими вокруг центра тяжести.

На опыты Рена затем ссылался Ньютон при установлении своих принципов.

Те же опыты, но более подробно, были затем описаны в сочинении «Об ударе тел» Э. Мариотта (1673). Для проведения опытов Мариотт сконструировал специальную «ударную машину».

**Христиан Гюйгенс (1629–1695)
Портрет работы Каспара Нечера (1671)**



Христиан Гюйгенс (1629–1695)

Выдающийся математик, физик и астроном Христиан Гюйгенс – одна из главных фигур научной революции XVII в. Сын голландского поэта и дипломата Константина Гюйгенса, он еще в очень молодом возрасте проявил себя в математике и астрономии.

Ранние достижения Гюйгенса включали исследования по классической математике (в традициях Архимеда и Аполлония), приближенное вычисление числа π , создание первого (печатного) трактата по теории вероятности, открытие одного из спутников Сатурна (Титана), правильное объяснение изменяющегося профиля Сатурна (гипотеза кольца), составление трактата по механике удара.

К 35 годам научный авторитет Гюйгенса был столь высоко, что его пригласили ко двору Людовика XIV для участия в формировании Королевской академии наук. Во Франции Гюйгенс оставался почти двадцать лет, за исключением поездок домой в периоды болезни.

Среди достижений Гюйгенса :

волновая теория света, теория центробежной силы, теория удара, теория маятника, техника изготовления линз для телескопов.

Математические работы молодого Гюйгенса

Математические способности Гюйгенса проявились в 1646 году, когда ему было семнадцать лет.

Три примера.

1. Исследование цепной линии. Его Гюйгенс предпринял после прочтения работ С. Стевина, изданных Альбером Жираром. Жирар утверждал, что кривая, образованная провисающей цепочкой, является параболой. Гюйгенс опроверг это утверждение (вспомним, что Галилей также отождествлял цепную линию с параболой).

2. В это же время Гюйгенс познакомился с работой Хуана Лобковица, в который тот сформулировал свою версию закона свободного падения. Лобковиц считал, что расстояния, пройденные падающим телом, прямо пропорциональны времени падения. Это утверждение Гюйгенс также смог опровергнуть.

3. В письме брату от 3 сентября 1646 г. Гюйгенс сообщил, что может доказать параболичность траектории полета снаряда, выпущенного под углом. Вскоре в его руки попала книга Галилея «Беседы и математические доказательства». Прочитав ее, Гюйгенс отказался писать свой трактат: «Мне расхотелось писать “Илиаду” после того, как это уже сделал Гомер».

Гюйгенс, «О движении тел под влиянием удара» (1703)

Законы удара абсолютно упругих тел.

В основу положены следующие «гипотезы»:

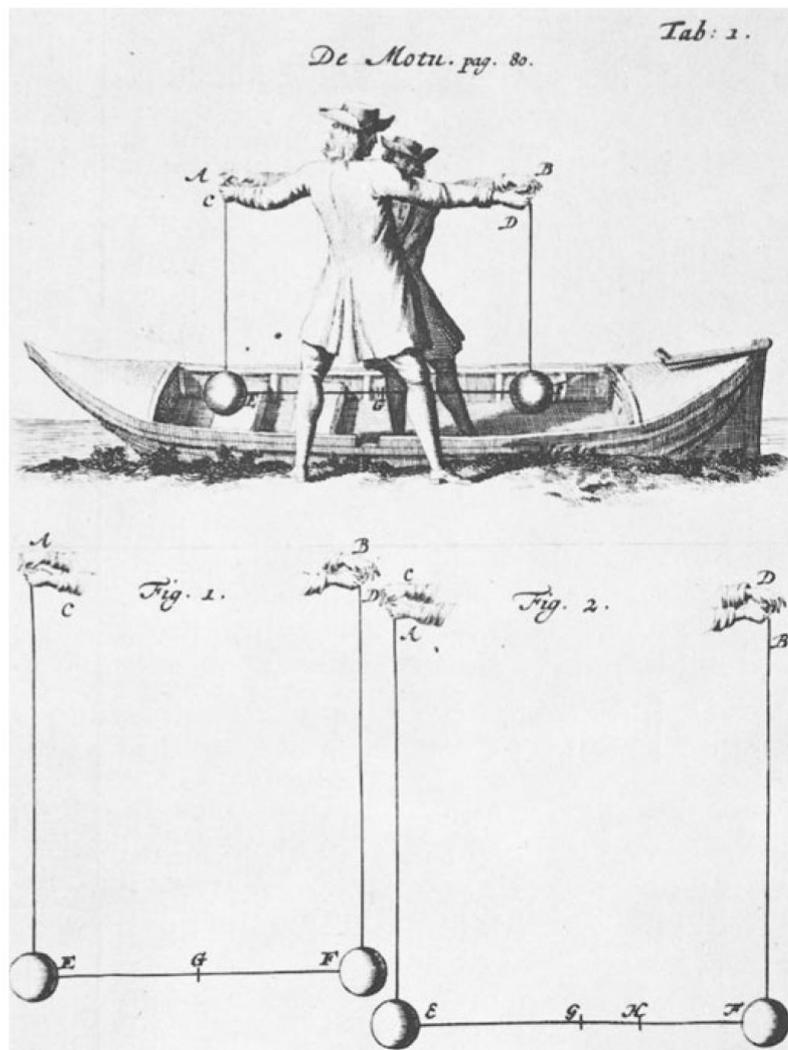
«1. Тело, приведенное в движение, при отсутствии противодействия продолжает свое движение неизменно с той же скоростью и по прямой линии» (закон инерции).

2. Не входя в рассмотрение причины отскакивания твердых тел после соударения, принимаем следующее положение: если два одинаковых тела, движущихся с одинаковой скоростью навстречу друг другу, сталкиваются прямым ударом, то каждое из них отскочит назад с той же скоростью, с какой ударилось.

Удар называется прямым, если само движение и соприкосновение происходят на прямой линии, соединяющей центры тяжести тел.

3. Движение тел, а также их одинаковые или разные скорости надо рассматривать как относительные по отношению к другим телам, которые мы считаем покоящимися, не учитывая того, что как те, так и другие тела могут участвовать в другом, общем движении. Поэтому два тела, соударяясь, даже в случае, если оба вместе участвуют еще в другом равномерном движении, для лица, также участвующего в общем движении, действуют друг на друга так, как будто бы этого общего движения не существовало».

«Два тела, соударяясь, даже в случае, если оба вместе участвуют еще в другом равномерном движении, для лица, также участвующего в общем движении, действуют друг на друга так, как будто бы этого общего движения не существовало».



Пояснение:

«Так, например, когда пассажир некоторого корабля, движущегося с постоянной скоростью, приводит к соударению два равных шара с равными по отношению к нему и частям корабля скоростями, то они должны отскочить с равными же, по отношению к нему, скоростями, точно так же, как это имеет место для стоящего на берегу и соударяющего те же шары с равными скоростями».

Гюйгенс, «О движении тел под влиянием удара» (1703)

«4. Если большее тело соударяется с меньшим, находящимся в покое, то оно сообщает последнему некоторое движение и, следовательно, теряет несколько в своем движении».

«5. Если при соударении двух твердых, движущихся навстречу друг другу тел обнаруживается, что одно из них сохранило свое движение, то и другое не выигрывает и не теряет ничего в движении».

Теория удара представлена тринадцатью предложениями (теоремами), доказательство которых проводится в строгих геометрических традициях с широким привлечением мысленных экспериментов, согласующихся с физическими представлениями читателей.

Гюйгенс, «О движении тел под влиянием удара» (1703)

Основные результаты Гюйгенса:

- «Если с покоящимся телом соударяется одинаковое с ним тело, то ударившее тело приходит в состояние покоя, а покоившееся тело приходит в движение со скоростью ударившегося о него».
- «Если два одинаковых тела соударяются с разными скоростями, то они при ударе обмениваются скоростями».
- «Если два тела сталкиваются, то их относительная скорость удаления после удара та же, что и относительная скорость сближения до удара».

Гюйгенс, «О движении тел под влиянием удара» (1703)

Предложение IX

«При соударении двух тел сумма произведений из их величин на квадраты их скоростей остается неизменной до и после удара; при этом отношение величин и скоростей должны быть выражены числами и отрезками» [с. 235].

В этой теореме, по сути, впервые используется введенное Лейбницем в 1695 г. понятие «живой силы». Позднее на его основе было сформулировано понятие кинетической энергии.

Гюйгенс также оперирует понятием «величина тела». Но это еще не ньютоновская масса...

В статье, опубликованной в «Journal des Sçavans» (1669), он пишет: «... я рассматриваю тела из одного и того же вещества или же принимаю, что величина тел определяется их весом».

В этой статье Гюйгенса получил еще один результат (не попавший в знаменитый мемуар 1703 г.):

«Кроме того, я заметил удивительный закон природы, который я могу доказать для сферических тел и который, по-видимому, справедлив и для всех других тел, твердых (упругих) и пластичных при прямом и при косом ударе: общий центр тяжести двух, трех или скольких угодно тел продолжает двигаться равномерно в ту же сторону по прямой линии как до, так и после удара».

Тема 3.
Спор о мере движения

Спор последователей Лейбница и картезианцев о значении законов сохранения количества движения и живых сил.

Картезианцы, следуя Декарту, считали основным законом природы закон сохранения количества движения. Этот закон хорошо описывал соударение абсолютно неупругих тел (ср. теория Дж. Валлиса). При описании упругого соударения, особенно в случае косоугольного удара, этого закона было недостаточно.

В 1686 г. Лейбниц выступил против точки зрения картезианцев со статьей «Краткое доказательство примечательной ошибки Декарта, касающейся мнимого закона природы, в силу которого Бог сохраняет всегда неизменным количество движения». Лейбниц настаивает на том, что основной механической характеристикой движущегося тела является его живая сила и основным законом механики является закон сохранения живых сил.

Конец полемике положила публикация трактата Иоганна Бернулли «Рассуждения о законах передачи движения» (1727), в котором теория удара была изложена на основе трех «законов»:

1. Абстракция абсолютно упругого соударения (относительная скорость тел до и после соударения остается неизменной).
2. Закон сохранения количества движения.
3. Закон сохранения живых сил (основной закон).