

## **Лекция 10а**

**Теория соударений в XVII – XVIII вв.**

Р. Декарт (1596-1650)

## **Основной принцип, - закон сохранения количества движения.**

### **«Законы природы» (три закона).**

1. «Всякая вещь пребывает в том состоянии, в каком она находится, пока ничто его не изменит».
2. «Всякое движущееся тело стремится продолжать свое движение по прямой».

Первые два закона природы - закон инерции.

**3-й закон** касается передачи количества движения от одного тела к другому при их ударе.

## **Р.Декарт (1596-1650)**

- **Семь правил для расчета соударения тел в различных случаях соотношений их «величин» (масс) и скоростей. Четкости в этих правилах нет: одни верны для упругого удара, другие правила верны для неупругого удара, но различия между этими явлениями Декарт не установил.**

## Р.Декарт (1596-1650)

- Факт, что масса тела **A** вдвое больше массы тела **B** у него выражается словами: **A вдвое превосходит B**. Тем не менее, из правил оперирования Декартом его мерой движения видно, что **количество движения оказывается пропорционально массе и скорости тела**. Четкого определения количества движения у Декарта нет, как нет четкого понятия массы тела.
- **Явление удара Декарт полагал в основу взаимодействия тел, не признавая взаимодействия тел на расстоянии.**

## Теория соударений...

- В картезианской физики: удар и контактное взаимодействие признавались единственной формой взаимодействия тел, частным случаем которого считалось давление жидкости и газа.
- Взаимодействие тел через пустоту картезианцы отрицали.

## Йоханнес Маркус (Ян Марек) Марци (1595—1667) — чешский учёный.



Работал в Пражском университете (с 1630 г. с 1662 г. ректор).

- Физические исследования посвящены [механике](#) и [оптике](#). В 1639 г. рассмотрел соударение твёрдых 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 относятся также к математике и медицине. За научные труды получил дворянский титул и должность императорского [лейб-медика](#).

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

DIVO  
FERDINANDO  
TERTIO

AUGUSTISSIMO ROMANORUM  
IMPERATORI

Hungariæ & Bohemiæ Regi &c.  
*Domino meo Clementissimo.*

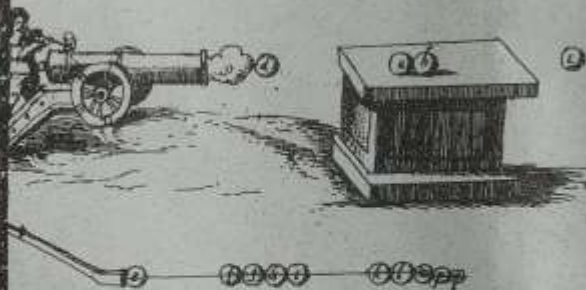
Augustissime Cæsar

**D**VM ut annus hic nouus TUÆ Maje-  
stati auspiciatus ordiatur, vota concipio,  
& à tenuitate meâ munusculum  
TUÆ Maje: gratum estagito: ecce ti-  
bi hunc ipsum, qui annum auspiciatur, atq; sua in ve-  
lignia renouit, motum mihi ultrò, ut Mercurius sit  
& munus, se offerentem: quid enim inquit extra  
ne quæris? in me sunt omnia. Absit, inquam ego,  
ut ad Cæsa rem eas, qui tam instabilis es & infidus,

A 2

atq;

liberè, & absq; ullo nexu: que percuti volumus à b ali  
globo, æquali tamen aut minori, quacūq; violentia, atq;  
ad eò à machinà bellicà effulminato, neq; tamen suo lo-  
co moueri: quod quidem nullis machinis, aut retinacu-  
lis, sed duntaxat unius globi appositione conseque-



mur, qui iram illius fulminis à globo percusso hauriat &  
absumat. Appone ergo à tergo alium globum illi æqua-  
lem b, & sit linea motus pilæ ad utrumq; globum perpen-  
dicularis, dico globum a nulla ratione loco moueri à  
globo d. Quia enim globus a eodem momento, quo  
percutitur à globo d, percutit globum b sibi æqualem,  
inducet illà percussione plagam perfectam, ac proinde  
per



## Иоганн Маркус Марци (1595-1667)

- 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.

## Теория соударений...

- В 1668 г. Лондонское Королевское общество объявило конкурс на лучшее исследование по теории соударения тел. На конкурс были представлены сочинения двух английских ученых **К. Рена** (1632-1723) и **Дж. Валлиса** (1616-1703) и голландца **Х. Гюйгенса** (1629-1695).

# Джон Уоллис (Валлис) - John Wallis (1616-1703)



Английский священнослужитель и математик , которому присвоена большая заслуга в развитии исчисления бесконечно малых .

Между 1643 и 1689 годами он служил главным криптографом в парламенте , а затем в королевском дворе.

Ему приписывают введение символа  $\infty$  для представления концепции бесконечности .

Дж. Уоллис был современником Ньютона и одним из величайших интеллектуалов раннего возрождения математики.

## Теория соударений...

- В 1668 г., **Уоллис** ограничился, не оговаривая этого, рассмотрением случаев **абсолютно неупругих ударов**. В качестве основной количественной характеристики он использовал здесь понятие **«момента»**: **произведение скорости тела на его вес**.

## Теория соударений...

- Рассматривая два тела с весом  $P_1$  и  $P_2$ , движущиеся по одной прямой со скоростями  $V_1$  и  $V_2$  до соударения, Уоллис получает для общей скорости  $U$  этих тел после соударения соотношение (без док-ва):

$$P_1 \cdot V_1 \pm P_2 \cdot V_2 = (P_1 + P_2) \cdot U$$

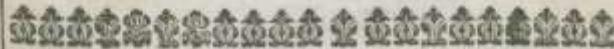
## Теория соударений...

- Вскоре вышел в свет **трехтомный трактат Уоллиса «Механика или о движении»**, где имелась уже развернутая теория соударения тел; в основу этой теории им были положены четко сформулированные **законы инерции и неизменности суммарной величины «силы движения» или «момента»**, т.е. по существу **количества движения**.
- Здесь Уоллис попытался ввести **различие между ударами абсолютно неупругим и абсолютно упругим**.

*Johannis Wallisi, S S. Th. D.*  
GEOMETRIÆ PROFESSORIS  
*SAVILIANI* in Celeberrimâ  
Academia OXONIENSIS;  
*OPERUM*  
MATHEMATICORVM  
*Pars Prima.*

*Qua continentur,*

Oratio Inauguralis.  
Mathesis Universalis; sive, Arithmeticum opus Integrum, tum Numerosam Arithmeticam tum Speciosam complectens.  
Adversus Meibomii; de Proportionibus Dialogum,  
Tractatus Elencticus.



OXONII,  
Typis LEON. LICHFIELD Academiæ Typographi,  
Impensis THO. ROBINSON. Anno 1657.

# Кристофер Рен- Christopher Wren (1632-1723)



Сэр **К. Рен** — английский **архитектор** и математик, который перестроил центр Лондона после великого пожара 1666 года.

Профессор математики в Оксфорде и один из основателей и деятельных членов Лондонского королевского общества, занимался исследованиями и решениями многих вопросов математики и механики.

Создатель национального стиля английской архитектуры — т. н. реновского классицизма.



# Собор Св. Павла в Лондоне



## К. Рен (1632-1723)

- **К. Рен** в мемуаре, поданном на конкурс, изложил правила расчета соударения **упругого удара** (не дав этому явлению четкого определения)

$$P_1 \cdot V_1 \pm P_2 \cdot V_2 = P_1 \cdot U_1 \pm P_2 \cdot U_2$$

*(в символах современной механики)*

**Христиа́н Гю́йгенс ван Зейлихем**  
( *Christiaan Huygens* [1629](#) - [1695](#))



Христиа́н Гю́йгенс - голландский физик, механик, математик и астроном, Христиан Гюйгенс, был непосредственным преемником Галилея в науке. Лагранж говорил, что Гюйгенсу «было суждено усовершенствовать и развить важнейшие открытия Галилея».

## Х.Гюйгенс (1629-1695)

- В 1669 г. Х.Гюйгенс представил свое предварительное сообщение о законах соударения Королевскому обществу.
- Мемуар Гюйгенса опубликовал парижский «Журнал ученых» (*Journal de Savants*)

Более обширное изложение того же исследования **Х. Гейгенса «О движении тел под влиянием удара»** было опубликовано посмертно в **1703г.**

- Гюйгенс предлагает способ определения скоростей тел после их соударения. Основным текст его трактата **«Теория удара твердых тел»** был закончен в 1652 году, но свойственное Гюйгенсу критическое отношение к своим трудам привело к тому, что трактат вышел только после смерти Гюйгенса.
- Правда, будучи в Англии в 1661 году, он демонстрировал опыты, подтверждающие его теорию удара. Секретарь Лондонского Королевского общества писал: «Был подвешен шар весом один фунт в виде маятника; когда он был отпущен, то по нему ударил другой шар, подвешенный точно так же, но только весом в полфунта; угол отклонения был сорок градусов, и Гюйгенс после небольшого алгебраического вычисления предсказал, каков будет результат, который оказался в точности соответствующим предсказанию».

## Х.Гюйгенс (1629-1695)

- Мемуар Гюйгенса «О движении тел под влиянием удара» начинается с формулировок *трех основных гипотез*, к которым далее добавляется еще две.
- Четкого разграничения упругого и неупругого удара у Гюйгенса еще нет. Имея в виду по существу *упругие тела*, Гюйгенс называет их «твердыми».

## Х.Гюйгенс (1629-1695)

- Первая гипотеза представляет собой **закон инерции.**
- Во второй утверждается, что после удара твердые тела равной величины обмениваются направлениями равных скоростей, не изменяя величины их. Таким образом, эту гипотезу можно считать **определением упругого удара тел.**



## **Х.Гюйгенс (1629-1695)**

- **Гюйгенс ввел способ представления скоростей тела до и после удара с помощью тех высот, падая с которых тела получали бы такие же скорости.**
- **Эти высоты Гюйгенс, как и Галилей, полагал пропорциональными квадратам самих скоростей в конце падения, устанавливая по существу некоторую энергетическую закономерность.**

## **Х.Гюйгенс (1629-1695)**

- Гюйгенс сформулировал следующее важное предложение: **при соударении двух тел сумма произведений их «величины» (массы) на квадрат их скорости остается неизменной до и после удара.**
- Тем самым Гюйгенс впервые устанавливал **закон сохранения кинетической энергии при ударе (предполагавшемся упругим).**

## Х.Гюйгенс (1629-1695)

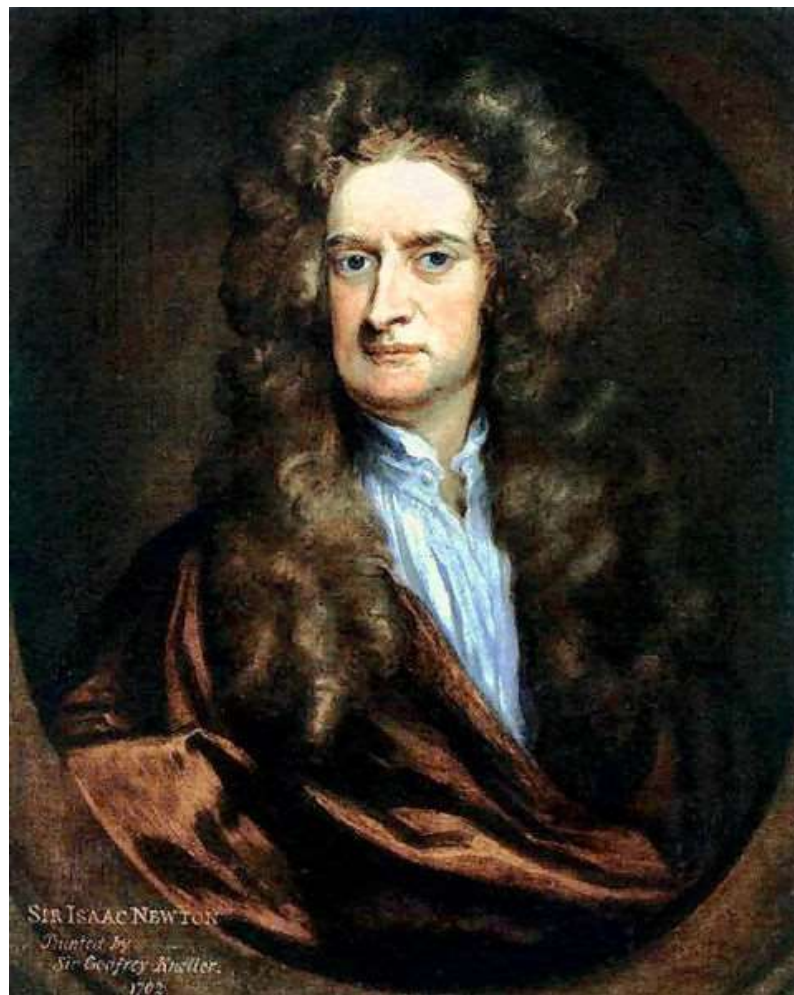
- Гюйгенс сформулировал еще одну гипотезу: **кинематический принцип относительности** в применении к явлению соударению тел.
- «Два тела, соударяясь, даже в случае, если оба вместе участвуют еще в другом равномерном движении, для лица, также участвующего в общем движении, действуют друг на друга так, как будто бы этого общего движения не существовало».

# О ДВИЖЕНИИ ТЕЛ ПОД ВЛИЯНИЕМ УДАРА



Пусть корабль или лодка движется прямолинейно и равномерно со скоростью  $u$ . Пассажир соударяет на нитях два «одинаковых» (по массе) шара, каждый из которых имеет скорость  $u$ , причем прямая скоростей соударения шаров совпадает с направлением движения корабля. Тогда по принципу относительности явление удара не зависит от движения корабля, шары обмениваются скоростями после удара; а абсолютные скорости шаров до удара будут:  $2u$  и  $0$ , после удара:  $0$  и  $2u$ , т.е. шары с неравными (абсолютными) скоростями при упругом ударе обмениваются скоростями, если масса шаров одинакова.

# Исаак Ньютон (*Isaac Newton*) (1643-1727)



## **И.Ньютон (1643-1727)**

- В 1664 г. **Ньютон** рассмотрел задачу о **неупругом ударе двух тел.**
- Ньютон в отличие от Декарта **сложение количеств движения точечного тела трактует алгебраически, а иногда с учетом их различных направлений (т.е. арифметически).**

## И.Ньютон (1643-1727)

- «Коэффициент восстановления» при ударе.
- «В телах не вполне упругих скорость расхождения должна быть уменьшаема соответственно степени упругости. Эта степень упругости... вполне определенная и (как мне кажется) производит то, что тела расходятся с такой *относительной* скоростью, которая составляет постоянную долю *относительной* скорости их встречи».

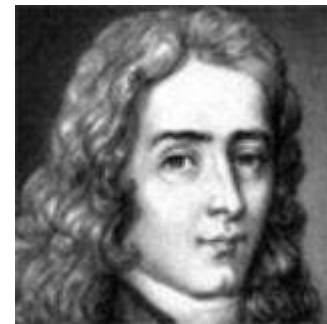
## И.Ньютон (1643-1727)

- Если обозначить коэффициент восстановления для удара двух тел через  $k$ , через  $u$  и  $v$  скорости тел до и после удара соответственно, то

$$k = \frac{|v_1 - v_2|}{|u_1 - u_2|}.$$



## Эдм Мариотт (*Edme Mariotte*) (1620-1684)



- «**О столкновении или ударе тел**», где описывается результаты многочисленных экспериментов на его установке, называемой **«ударной машиной»**.

Под **величиной тела** Мариотт понимал **объем с некоторой телесностью или сгущением вещества**.

# Теория соударений...

- Исследователи, которые обобщали материал **неупругих ударов**, неосознанно опирались на **закон сохранения количества движения**.
- Ученые, которые рассматривали удар более близкий к **абсолютно упругому** (абстрактный крайний случай), опирались на **закон сохранения энергии**.

*(спор о мере движения в конце XVII в.)*

# Теория соударений...

- Первую четкую формулировку абстракции **абсолютно упругого удара** (сохранение **относительной скорости** ударяющихся шаров до и после удара) дал **Иоганн Бернулли** (*Johann Bernoulli*) в 1727 г.



# Спор о мере движения

- В 1686г. Г.В. Лейбниц (*Gottfried Wilhelm Leibniz*) поместил в «*Acta eruditum*» статью полемического характера «**Краткое доказательство ошибки достопамятного Декарта и других касательно закона природы, благодаря которому бог желает сохранить всегда количество движения тем же**».
- Этой статьей и было положено начало **спора о мере движения**



## Спор о мере движения

- $mv$  (по Декарту)
- $mv^2$  (по Лейбницу).
- И.Бернулли называет Лейбница первым, кто заметил это различие и ввел различие ``живых" и ``мертвых"

# Спор о мере движения

- И. Бернулли считает важнейшей характеристикой **живую силу**, а закон **сохранения живых сил** он провозглашает **незыблемым** и **первостепенным по важности законом природы**

# Спор о мере движения

- И. Бернулли дает более четкую формулировку **абсолютно упругого удара** двух тел:  
«Если два совершенно упругих тела, конечной или бесконечной тугости, встречаются прямо, двигаясь друг против друга, то... их относительная скорость будет одна и та же как до, так и после удара».

# Спор о мере движения

- В середине XVIII в. по этой проблеме высказался **Ж. Даламбер**, претендуя сказать в нем последнее слово: «Я считал ненужным вдаваться в рассмотрение нашумевшего вопроса о «живых силах». Этот вопрос, который уже тридцать лет разделяет геометров, заключается в следующем: **чему пропорциональна сила движущегося тела - произведению массы на скорость или произведению массы на квадрат скорости?**



**Жан Лерон Д'Аламбэр (Даламбер)**  
*Jean Le Rond D'Alembert (1717-1783)*



## Ж.Даламбер (1717-1783)

- Даламбер формально доказал сводимость друг к другу обеих механических характеристик  $mv$  и  $mv^2$ . Рассматривается тело массой  $m$ , движущееся прямолинейно с мгновенной скоростью  $v$  по прямой, которое затормаживается силой  $F$  в течение времени  $t$  на расстоянии  $s$ . Сила может быть выражена двояко, замечает Даламбер:

$$F = \frac{d(mv)}{dt}$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot \frac{d(mv^2)}{ds}$$

# Спор о мере движения

- **«Механическое движение обладает двойкой мерой движения: если механическое движение превращается в механическое же движение, то его мерой может быть количество движения или сила, измеряемая производной от количества движения по времени; если же механическое движение переходит в теплоту или другие виды движения, то его мерой должна служить энергия или работа. Эта последняя мера является более общей и универсальной». (Ф. Энгельс)**