

# ЧУЕВ Анатолий Степанович

## доцент кафедры ФН-4

<http://www.bmstu.ru/ps/~chuev/>

Персональные страницы

Сайт кафедры «Физика» (ФН-4):

<http://www.fn.bmstu.ru/>

Презентации лекций

<http://hoster.bmstu.ru/~moodle/>

Кодовое слово: Civilist\_1 или 143980\_Uch

## Лекция 2. «Закон сохранения импульса»

- *Масса, импульс* (количество движения)
- *Силы*, разновидности сил.
- Инерциальная система отсчета
- Динамика материальной точки
- Механическая система (МС) и ее центр масс
- Уравнение изменения импульса МС
- Закон сохранения импульса

Истинное знание есть знание причин

*Аристотель*

Я не знаю, что мир думает обо мне; себе самому я кажусь всего лишь мальчиком, играющим на берегу, возвращающим себя в настоящее, но потом находящим гладкий камешек или необычайно красивую ракушку, - в то время как великий океан непостижимой истины простирается передо мной"

*(Исаак Ньютон)*

## *Первый закон Ньютона – закон инерции*

- всякая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит её (его) изменить это состояние.*

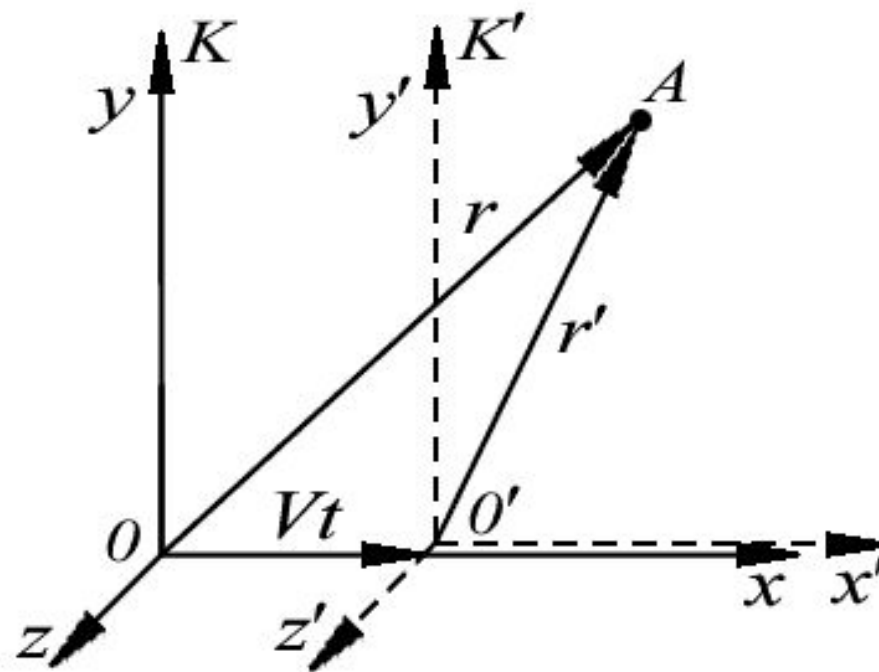
# Инерциальная система

Систему отсчета называют *инерциальной*, если свободная частица, не подверженная действию никаких других тел, движется в ней прямолинейно и равномерно, или, как говорят, по инерции.

## *Принцип относительности Галилея:*

- все инерциальные системы по своим механическим свойствам эквивалентны друг другу. Это значит, что никакими механическими опытами, проводимыми "внутри" данной инерциальной системы, нельзя установить, покоится эта система отсчета или движется. Во всех инерциальных системах отсчета свойства пространства и времени одинаковы, одинаковы также и все законы механики.

Не рисовать



Преобразования Галилея:

$$\vec{r}' = \vec{r} - \vec{v}_0 t \quad t = t'$$

$$x' = x - v_0 t, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t = t'. \quad \vec{v}' = \vec{v} - \vec{v}_0.$$

при  $\vec{v}_0 = \text{const} \quad \vec{a} = \vec{a}'$



# Масса

- Инертная масса (кг)
- Гравитационная (кинематическая) масса  $m_1 / m_2 = a_1 / a_2$  измеряется в  $(\text{м}^3/\text{с}^2)$
- **Гравитационная постоянная  $G$**  – это соотношение инертной и гравитационной масс ( $G$  в  $LT$ -системе безразмерная величина)

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{с}^2 \text{кг}}$$

3-й закон Кеплера:  $\frac{R^3}{T^2} = \frac{Gm_c}{4\pi^2}$

Масса величина **аддитивная**  $m = \sum m_i$

**Импульс**  $\vec{P} = m\vec{v} = \vec{F}t$

Единица измерения  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}}$

Размерность  $\text{MLT}^{-1}$

**Сила**  $\vec{F} = m\vec{a}$

Единица измерения  $\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$

Размерность  $\text{MLT}^{-2}$

# Второй закон Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- **Масса** - мера инертности материальных тел
  - **Инертность** - свойство, выражающее степень сопротивления тела к изменению его скорости
- $\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt}$  существуют инерциальные системы отсчета (ИСО), где импульс частицы сохраняется при отсутствии действия других тел.

Принцип суперпозиции сил  $\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots,$

# Третий закон Ньютона

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

- *Силы, с которыми две материальные точки воздействуют друг на друга, всегда равны по модулю и направлены в противоположные стороны вдоль прямой, соединяющей эти точки*

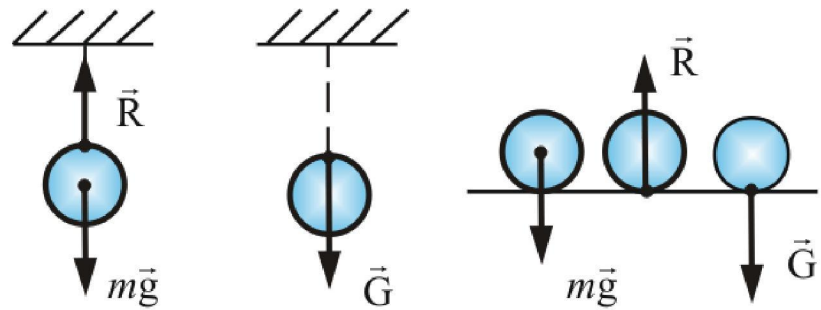
*Согласно этому закону, взаимодействие между телами распространяется в пространстве с бесконечно большой скоростью*

# СИЛЫ в механике

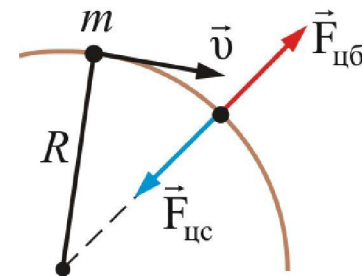
гравитационная

$$\vec{F}^{\pm} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{e}_r$$

тяжести и веса

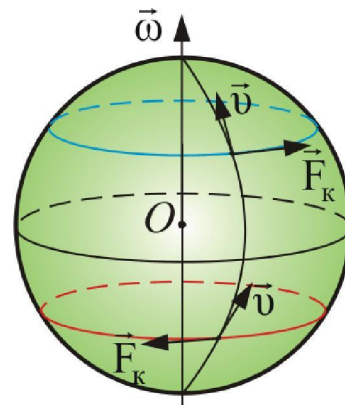


центробежная  
и центростремительная



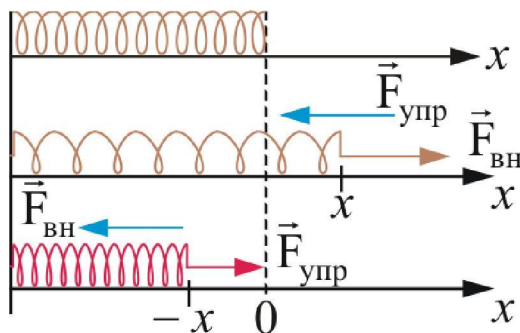
# СИЛЫ в механике

## Кориолиса



$$x = \frac{1}{k} F_{\text{вн.}},$$

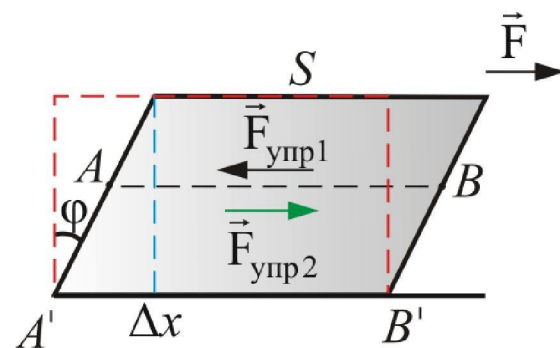
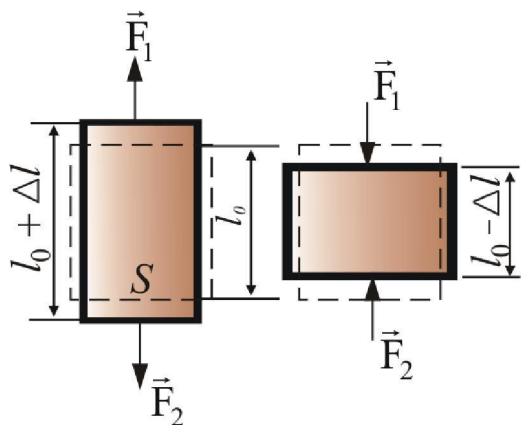
## Упругости



## Деформации

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр.}}}{S},$$

$$\tau = \frac{F_{\text{упр.}}}{S},$$

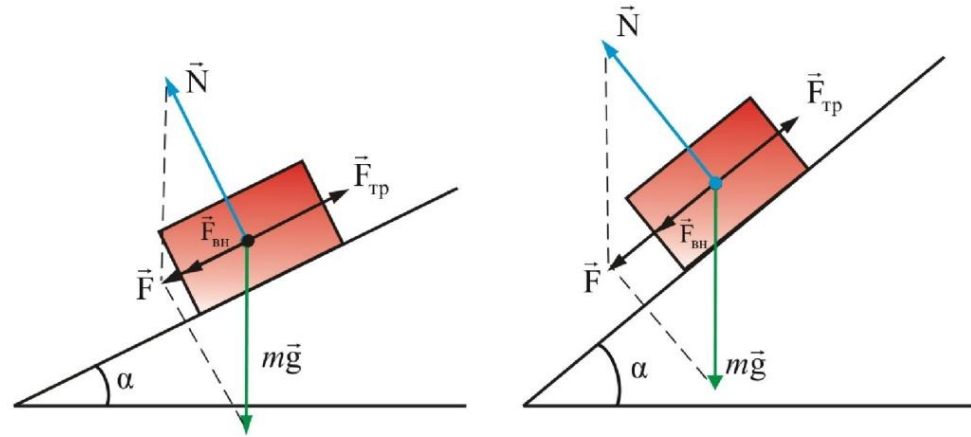


# СИЛЫ в механике

## Трения скольжения

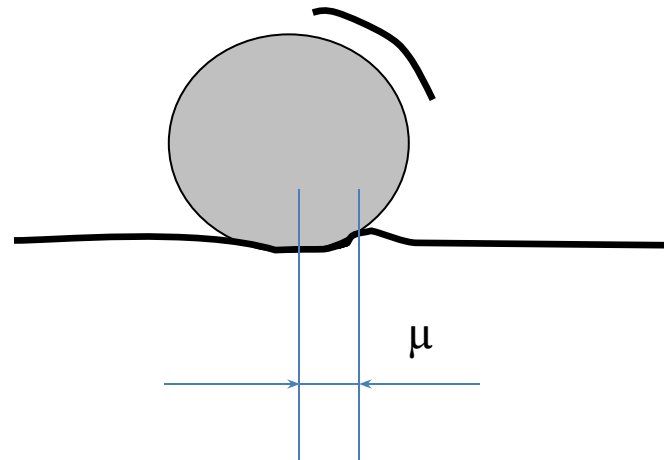
$$F_{\text{тр}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha,$$

$$F = mg \sin \alpha.$$

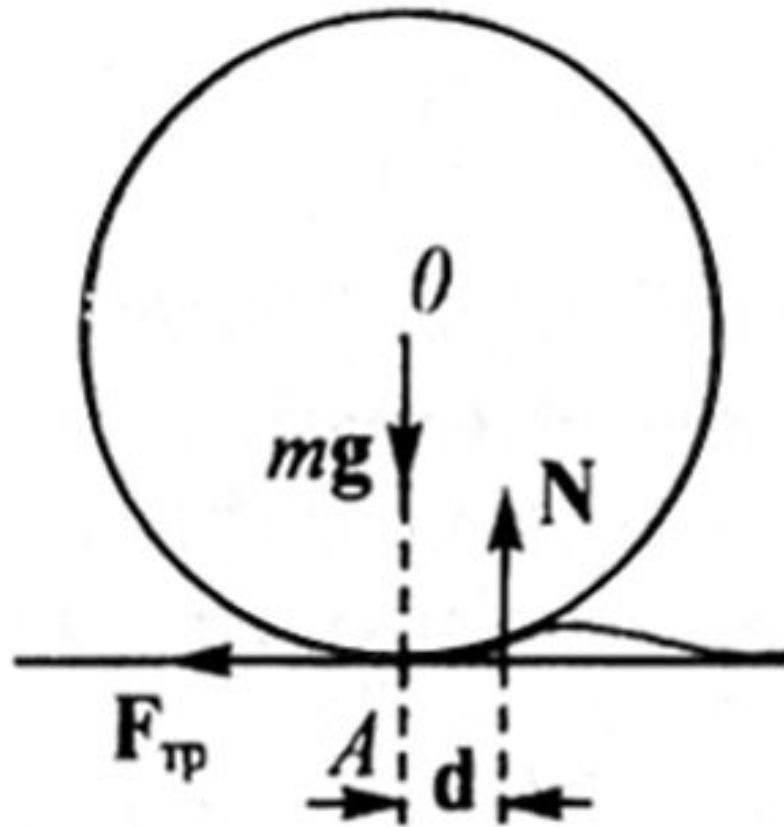


## Трения качения

$$M = \mu mg$$



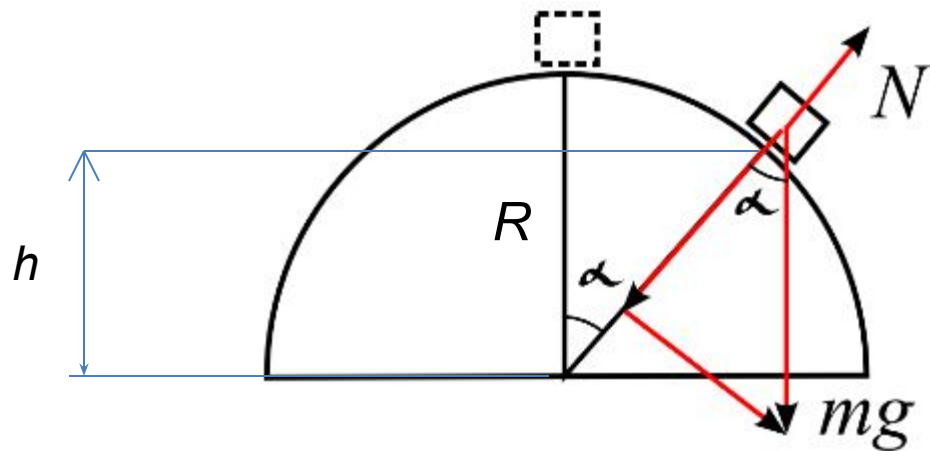
# Трение качения



$$Nd = mgd$$



## Соскальзывание частицы с полусферы: $h=?$



$$v = \sqrt{2g(R - h)}$$

$$mgR = mgh + \frac{mv^2}{2}$$

$$mg \cos \alpha + N = \frac{mv^2}{R}$$

Отрыв тела от поверхности сферы произойдет при  $N = 0$ . Подставляя выражение для скорости, получим:

$mg \cos \alpha = 2mg(R - h)/R$ . учитывая, что  $h = R \cos \alpha$ , получаем ответ:

$$h = \frac{2}{3}R.$$

# Соскальзывание частицы с полусферы: $v = ?$

Уравнение для сил:

$$m\omega^2 R = mg \cos \alpha - N$$

$$m \frac{dv}{dt} = mg \sin \alpha$$

$$v = \frac{dl}{dt}$$

$$dt = \frac{dl}{v} = \frac{Rd\alpha}{v}$$

$$v dv = gR d(\sin \alpha) d\alpha \quad \longrightarrow \quad v^2 = 2gR(1 - \cos \alpha)$$

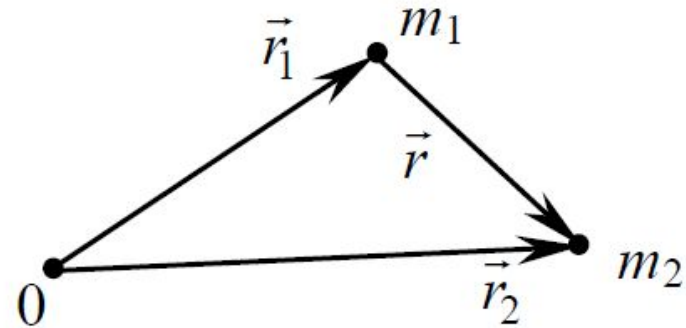
$$v^2 = 2gR(1 - \cos \alpha) = 2g(R - h) = \frac{2}{3} gR$$

$$v = \sqrt{\left(\frac{2}{3} gR\right)} \quad !$$

# Система нескольких масс

Центр масс системы

$$\vec{r}_C = \frac{1}{m} \sum m_i \vec{r}_i$$



По второму закону Ньютона

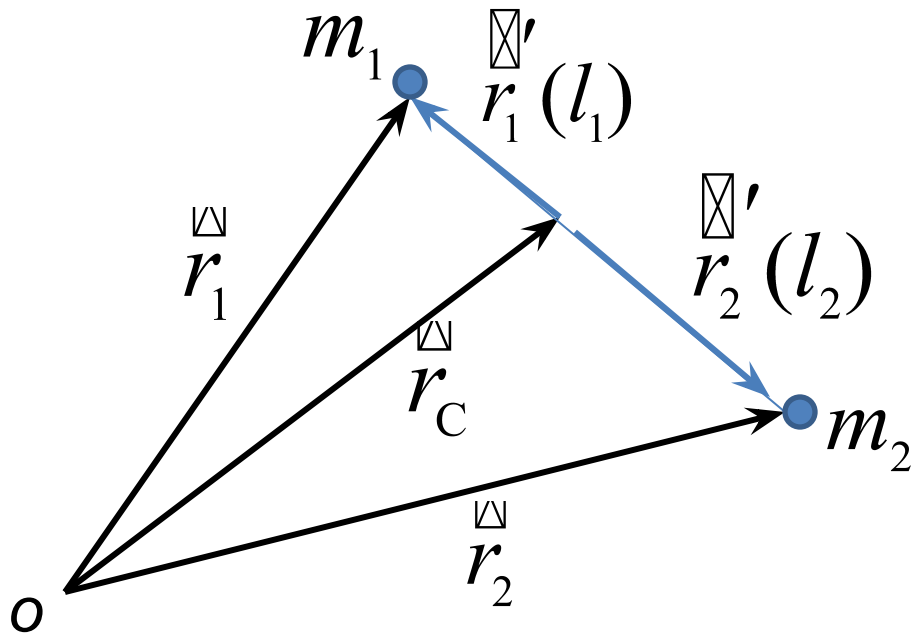
$$m_1 \ddot{\vec{r}}_1 + m_2 \ddot{\vec{r}}_2 = 0,$$

Интегрируем по  $t$

$$m_1 \dot{\vec{r}}_1 + m_2 \dot{\vec{r}}_2 = \text{const},$$

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p} = \text{const}$$

# Центр масс системы точечных масс



$$\vec{r}_C = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}$$

$$\vec{r}'_1(l_1) = \vec{r}_1 - \vec{r}_C$$

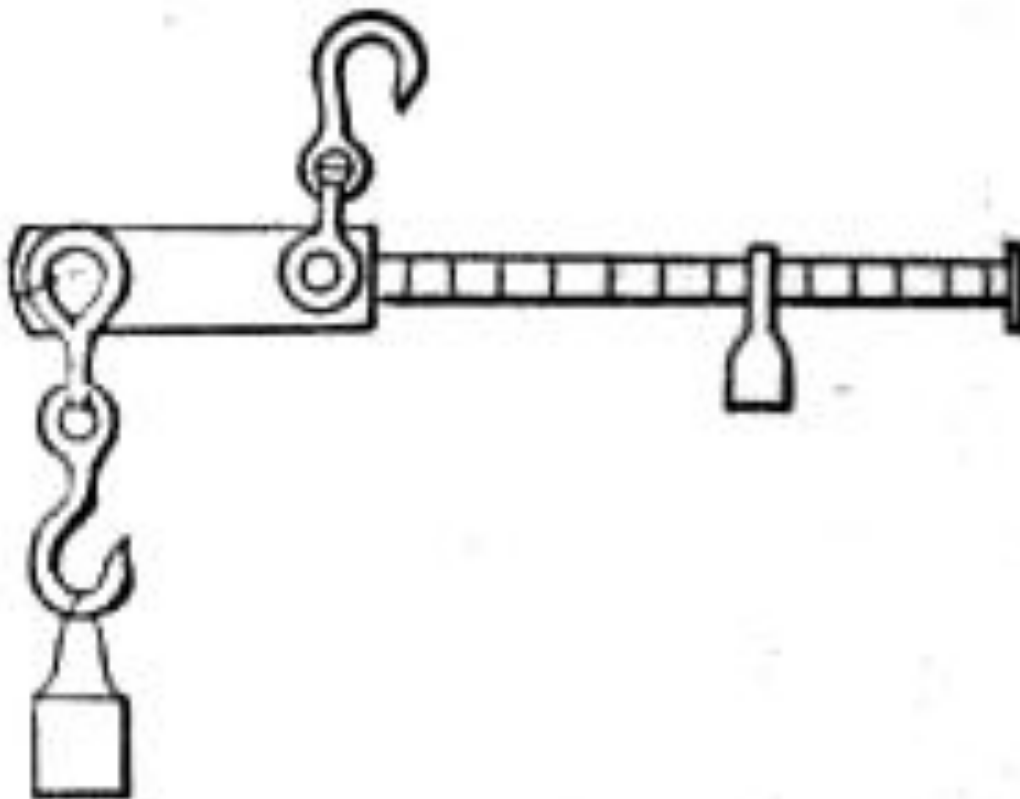
$$\vec{r}'_2(l_2) = \vec{r}_2 - \vec{r}_C$$

$$\vec{r}'_1(l_1) = \frac{m_2}{m_1 + m_2} (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$$

$$\vec{r}'_2(l_2) = \frac{m_1}{m_1 + m_2} (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)$$

Оба вектора коллинеарны и противоположно направлены, т.о. они лежат на одной прямой. Модули этих векторов обратно пропорциональны массам.

# Римский безмен



# Скорость в системе центра масс

$$\vec{v}_c = \dot{\vec{r}}_c = \frac{m_1 \dot{\vec{r}}_1 + m_2 \dot{\vec{r}}_2}{m_1 + m_2} = \frac{\vec{p}}{m_1 + m_2}$$

$$\vec{p} = m \vec{v}_c,$$

Уравнение движения ЦМ:

$$m \frac{d\vec{v}_c}{dt} = \vec{F}_{\text{внеш}},$$

# Закон сохранения импульса системы

Импульсом системы  $\vec{p}$  называется векторная сумма импульсов тел, образующих систему,

$$\vec{p} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots + \vec{p}_N = \sum_{i=1}^N \vec{p}_i.$$

Назовем центром инерции системы точку, положение которой в пространстве задается радиусом-вектором  $\vec{r}_c$ , определяемым следующим образом:

$$\vec{r}_c = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2 + \dots + m_N \vec{r}_N}{m_1 + m_2 + \dots + m_N} = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{\sum_i m_i} = \frac{\sum_i m_i \vec{r}_i}{m},$$

где  $m_i$  — масса  $i$ -го тела,  $\vec{r}_i$  — радиус-вектор, определяющий положение этого тела в пространстве,  $m$  — масса системы.

Декартовы координаты центра инерции равны проекциям  $\vec{r}_c$  на координатные оси:

$$x_c = \frac{\sum m_i x_i}{m}; \quad y_c = \frac{\sum m_i y_i}{m}; \quad z_c = \frac{\sum m_i z_i}{m}.$$

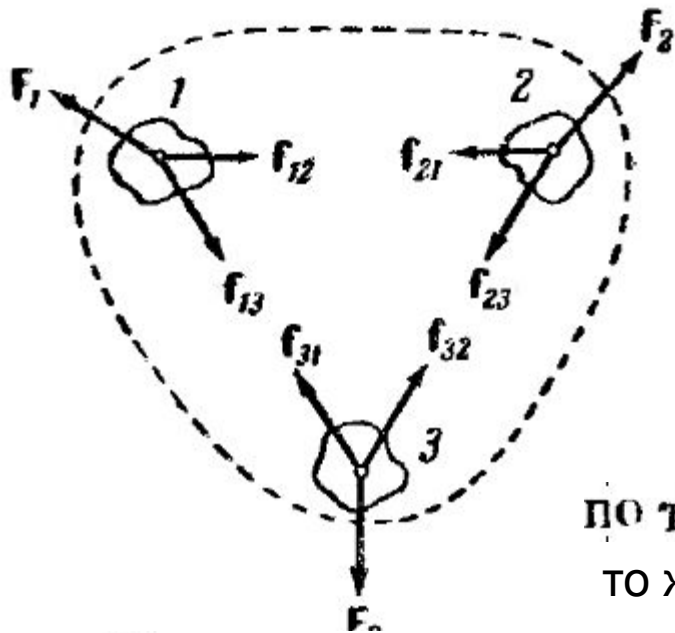
Скорость центра инерции получается путем дифференцирования  $r_c$  по времени:

$$\vec{v}_c = \dot{\vec{r}}_c = \frac{\sum m_i \dot{\vec{r}}_i}{m} = \frac{\sum m_i \vec{v}_i}{m}$$

Учитывая, что  $m_i \vec{v}_i$  есть  $\vec{p}_i$ , а  $\sum \vec{p}_i$  дает импульс системы  $\vec{p}$ , можно написать

$$\vec{p} = m \vec{v}_c.$$





$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \vec{p}_1 &= \vec{f}_{12} + \vec{f}_{13} + \vec{F}_1, \\ \frac{d}{dt} \vec{p}_2 &= \vec{f}_{21} + \vec{f}_{23} + \vec{F}_2, \\ \frac{d}{dt} \vec{p}_3 &= \vec{f}_{31} + \vec{f}_{32} + \vec{F}_3. \end{aligned}$$

по третьему закону Ньютона  $\vec{f}_{12} = -\vec{f}_{21}$ .  
то же самое и для других внутренних сил.

Сложим все три уравнения вместе. Сумма внутренних сил будет равна нулю, вследствие чего

$$\frac{d}{dt} (\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3) = \frac{d}{dt} \vec{p} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3.$$

При отсутствии внешних сил получается, что

$$\frac{d}{dt} \vec{p} = 0,$$

следовательно, для замкнутой системы  $\vec{p}$  постоянен.

# уравнение изменения импульса СИСТЕМЫ

$$\boxed{d\bar{p}/dt = \bar{F}_{\text{внеш}},} \quad \star$$

где  $\bar{F}_{\text{внеш}}$  — результирующая всех внешних сил,  $\bar{F}_{\text{внеш}} = \sum \bar{F}_i$ .

Уравнение  $\star$  означает: производная импульса системы по времени равна векторной сумме всех внешних сил, действующих на частицы системы.

Как и в случае одной частицы, из уравнения следует, что приращение импульса системы за конечный промежуток времени  $t$  есть

$$\boxed{\bar{p}_2 - \bar{p}_1 = \int_0^t \bar{F}_{\text{внеш}} dt,}$$

# Закон сохранения импульса системы

Согласно уравнению  $\star$  импульс системы может изменяться под действием только внешних сил. Внутренние силы не могут изменить импульс системы. Отсюда непосредственно вытекает закон сохранения импульса:

*импульс замкнутой системы частиц остается постоянным, т. е. не меняется со временем:*

$$\boxed{\vec{p} = \sum \vec{p}_i(t) = \text{const.}}$$

При этом импульсы отдельных частиц или частей замкнутой системы могут меняться со временем, что и подчеркнуто в последнем выражении. Однако эти изменения всегда происходят так, что приращение импульса одной части системы равно убыли импульса оставшейся части системы.

# Пример: человек, движущийся на

## плоту

**Пример:** Человек массы  $m_1$  находится на узком плоту массы  $m_2$ , который покоится на поверхности озера. Человек совершил перемещение  $\Delta r'$  относительно плота и остановился. Сопротивление воды пренебрежимо мало. Найдем соответствующее перемещение  $\Delta r_2$  плота относительно берега.

В данном случае результирующая всех внешних сил, действующих на систему человек — плот, равна нулю, поэтому импульс этой системы меняться не будет, оставаясь равным нулю в процессе движения:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = 0,$$


где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости человека и плота относительно берега. Но скорость человека относительно берега можно представить в виде  $v_1 = v_2 + v'$ , где  $v'$  — скорость человека относительно плота. Исключив  $v_1$  из этих двух уравнений, получим

$$\vec{v}_2 = - \frac{m_1}{m_1 + m_2} \vec{v}'.$$

Умножив обе части на  $dt$ , найдем связь между элементарными перемещениями плота  $dr_2$  и человека  $dr'$  относительно плота. Такая же связь будет, очевидно, и для конечных перемещений:

# Ц-система отсчета

Систему отсчета, жестко связанную с центром масс и перемещающуюся поступательно по отношению к инерциальным системам, называют системой центра масс или, кратко, Ц-системой.

Отличительной особенностью Ц-системы является то, что *полный импульс системы частиц в ней всегда равен нулю* — это непосредственно следует из формулы (  ), ибо в Ц-системе  $V_C = 0$ . Другими словами, любая система частиц как целое покоится в своей Ц-системе.

$$\mathbf{p} = m \mathbf{V}_C, \quad \text{$$

Уравнение движения ЦМ:

$$m \frac{dV_C}{dt} = F_{\text{внеш}},$$

# Импульсы 2-х частиц в Ц-системе

$$\vec{p}_1 = m_1 \vec{v}_1 = m_1 (\vec{v}_1 - \vec{V}_C), \quad \vec{p}_2 = m_2 \vec{v}_2 = m_2 (\vec{v}_2 - \vec{V}_C),$$

где  $V_C$  — скорость Ц-системы относительно К-системы отсчета. После подстановки в эти формулы выражения  $V_C = (m_1 v_1 + m_2 v_2) / (m_1 + m_2)$  получим

$$\vec{p}_1 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\vec{v}_1 - \vec{v}_2), \quad \vec{p}_2 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\vec{v}_2 - \vec{v}_1).$$

$$\vec{p}_1 = -\vec{p}_2.$$

# Столкновение двух частиц

для импульса каждой частицы в  $\mathcal{C}$ -системе.

$$\vec{p}_1 = \mu (\vec{v}_1 - \vec{v}_2), \quad \vec{p}_2 = \mu (\vec{v}_2 - \vec{v}_1),$$

где  $v_1$  и  $v_2$  — скорости частиц в исходной системе отсчета,  $\mu$  — приведенная масса системы.

$$\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2},$$

$$\tilde{p} = \mu v_{\text{огн}},$$

соотношение модулей

**Линия удара** – линия, проходящая через центры масс соударяющихся тел.

Кинетическая энергия в системе ЦМ  $\tilde{T} = \tilde{T}_1 + \tilde{T}_2 = \tilde{p}^2/2m_1 + \tilde{p}^2/2m_2.$

Так как  $1/m_1 + 1/m_2 = 1/\mu,$  то

$$\boxed{\tilde{T} = \frac{\tilde{p}^2}{2\mu} = \frac{\mu v_{\text{отн}}^2}{2} .}$$

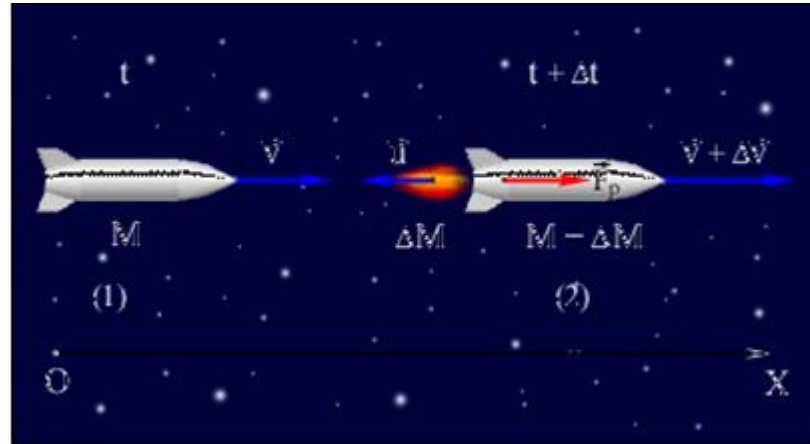
Если частицы взаимодействуют друг с другом, то полная механическая энергия частиц в Ц-системе

$$\tilde{E} = \tilde{T} + U,$$

где  $U$  — потенциальная энергия взаимодействия данных частиц.



# Реактивное движение



Уравнение Мещерского:

$$F^{\text{внешн}} = \frac{dm}{dt} \cdot u + \frac{m dv}{dt}$$

Формула Циолковского:

$$v = u \ln \frac{m_0}{m}$$

$$\vec{F}_{\text{внешн}} = \frac{dm}{dt} \cdot \vec{u} + \frac{m d\vec{v}}{dt} \quad - \quad \text{уравнение } \underline{\text{Мещерского}}.$$

$$\vec{F}_p = -\vec{u} \frac{dm}{dt} \quad - \quad \text{реактивная сила, действующая на тело переменной массы.}$$

Если внешних сил нет, то  $-u \frac{dm}{dt} = m \frac{dv}{dt}$ . При начальной скорости ракеты

равной нулю  $m dv = -u dm$ . Отсюда  $dv = -u \frac{dm}{m}$ .  $\int_0^v dv = -u \int_{m_0}^m \frac{dm}{m}$

$$v = -u(\ln m - \ln m_0) \quad m_0 - \text{начальная масса ракеты.}$$

$$v = u \ln \frac{m_0}{m} \quad - \quad \text{формула Циолковского.}$$

Таким образом,  $v_{\text{max}} = u \ln \frac{m_0}{m_0 - m_\tau}$  – максимальная скорость ракеты, где

$m_\tau$  - масса топлива + масса окислителя.

## Абсолютно неупругое столкновение.

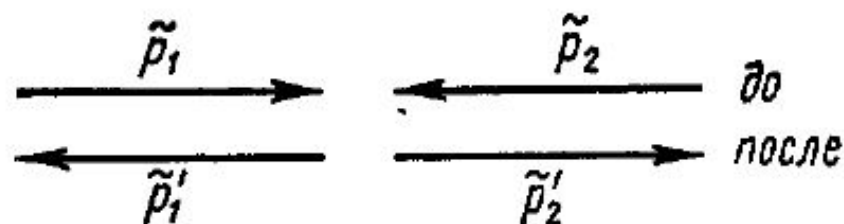
$$(m_1 + m_2) \vec{v}' = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2.$$

кинетическая энергия  $T$  частиц

целиком переходит во внутреннюю энергию  $Q$

$$Q = \frac{\mu v_{\text{отн}}^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^2.$$

## Абсолютно упругое столкновение.



Лобовое столкновение — обе частицы до и после столкновения движутся по одной и той же прямой.

При лобовом столкновении двух частиц, имеющих одинаковые модули импульсов и скоростей

в  $C$ -системе:  $\tilde{\mathbf{v}}'_i = -\tilde{\mathbf{v}}_i$  и  $\tilde{\mathbf{p}}'_i = -\tilde{\mathbf{p}}_i$ , где  $i = 1, 2$ .

Тогда  $\mathbf{v}'_i = \mathbf{V}_C + \tilde{\mathbf{v}}'_i = \mathbf{V}_C - \tilde{\mathbf{v}}_i = \mathbf{V}_C - (\mathbf{v}_i - \mathbf{V}_C) = 2\mathbf{V}_C - \mathbf{v}_i$ ,

где  $\mathbf{V}_C$  — скорость центра масс ( $C$ -системы) в  $K$ -системе отсчета

Тогда скорость  $i$ -й частицы в  $K$ -системе после столкновения

$$\mathbf{v}'_i = 2\mathbf{V}_C - \mathbf{v}_i, \quad \text{где } i = 1, 2.$$

В проекциях на произвольную ось  $x$

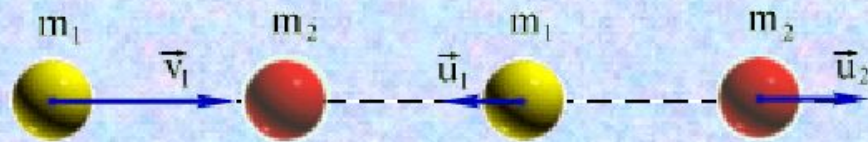
$$v'_{ix} = 2V_{Cx} - v_{ix}.$$

В частности, если массы частиц одинаковы, то легко убедиться, что частицы в результате столкновения просто обмениваются скоростями, т. е.  $\mathbf{v}'_1 = \mathbf{v}_2$  и  $\mathbf{v}'_2 = \mathbf{v}_1$ .

# Ударное взаимодействие тел

## Абсолютно упругий удар

Если направление движения тел совпадает с **линией удара**, то удар **центральный**

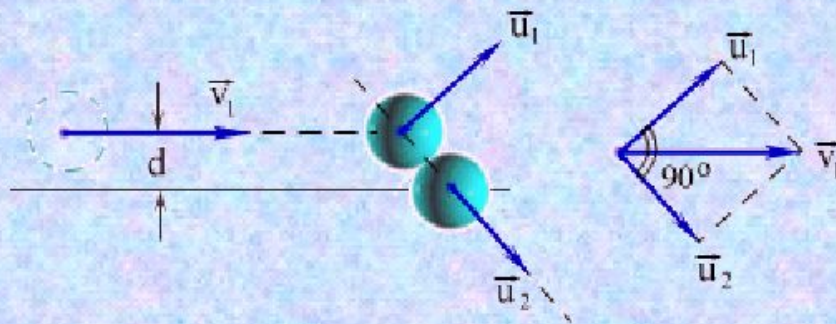


$$m_1 V_1 + m_2 V_2 = m_1 U_1 + m_2 U_2$$

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} + \frac{m_2 V_2^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2}$$

$$P_1 + P_2 = P_1 + P_2$$

**нецентральный**



$$m_1 V_1 = m_1 U_1 + m_2 U_2$$

$$\frac{m_1 V_1^2}{2} = \frac{m_1 U_1^2}{2} + \frac{m_2 U_2^2}{2}$$

$$P_1 = P_1 + P_2$$

$90^\circ$  при  $m_1 = m_2$

Для АУУ, решив систему уравнений относительно скоростей, получим:

Обозначим:  $U_1 = v'_1$   $U_2 = v'_2$

$$v'_1 = \frac{2m_2 v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2};$$

$$v'_2 = \frac{2m_1 v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}.$$

# Абсолютно упругий удар шара о массивную стенку.

Стенку можно рассматривать как неподвижный шар с  $v_2 = 0$  и массой  $m_2 \rightarrow \infty$

Разделим числитель и знаменатель на  $m_2$  и пренебрежем  $m_1 / m_2$  тогда

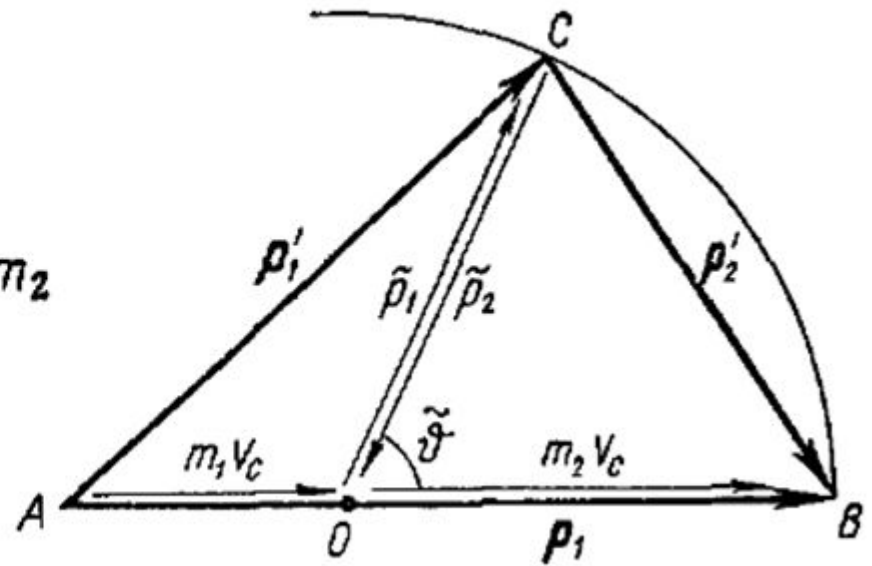
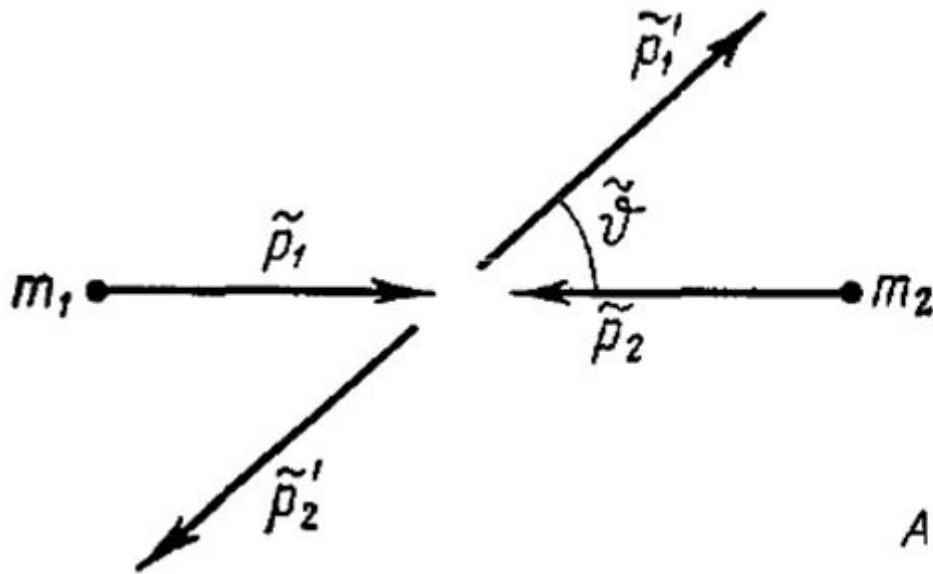
$$v'_1 = \frac{2v_2 + \left(\frac{m_1}{m_2} - 1\right)v_1}{\frac{m_1}{m_2} + 1} = \frac{2v_2 - v_1}{1},$$

при  $v_2 = 0$  получим  $v'_1 = -v_1$

## 2. Нелобовое столкновение. двух частиц, одна из которых ( $m_2$ ) покоится

в Ц-системе.  $\tilde{p}' = \tilde{p}$ .

$$\mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 = (m_1 + m_2) \mathbf{V}_C = \mathbf{p}_1$$





## Вывод конечной формулы:

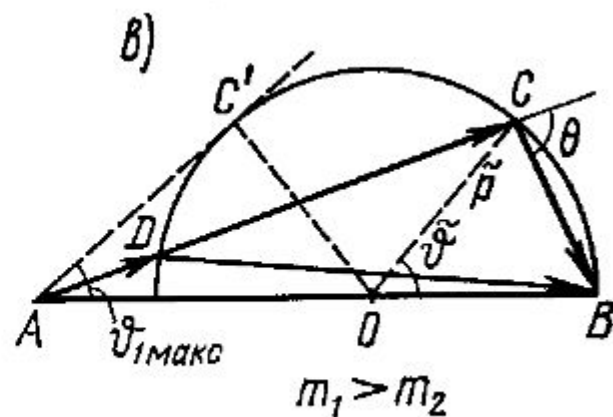
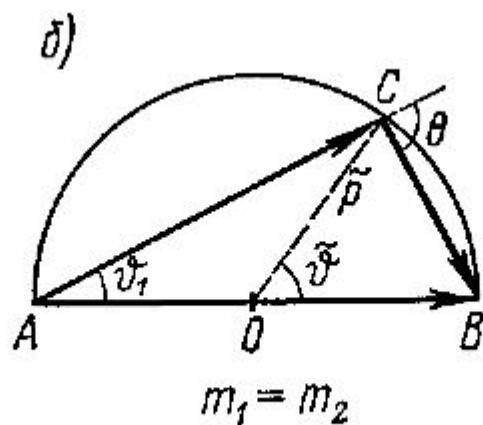
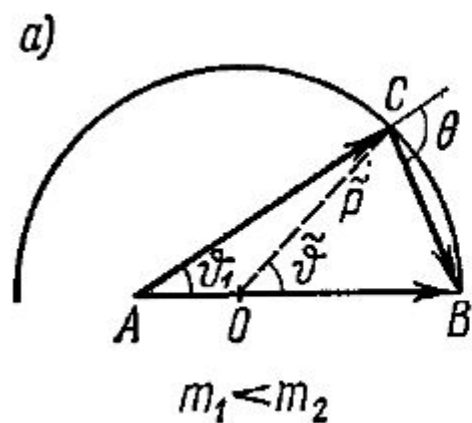
$$\mathbf{p}'_1 = m_1 \mathbf{v}'_1 = m_1 (\mathbf{V}_C + \tilde{\mathbf{v}}'_1) = m_1 \mathbf{V}_C + \tilde{\mathbf{p}}'_1,$$

$$\mathbf{p}'_2 = m_2 \mathbf{v}'_2 = m_2 (\mathbf{V}_C + \tilde{\mathbf{v}}'_2) = m_2 \mathbf{V}_C + \tilde{\mathbf{p}}'_2,$$

где  $\mathbf{V}_C$  — скорость  $C$ -системы относительно  $K$ -системы отсчета.

Сложив отдельно левые и правые части этих равенств с учетом того, что  $\tilde{\mathbf{p}}'_1 = -\tilde{\mathbf{p}}'_2$ , получим

$$\mathbf{p}'_1 + \mathbf{p}'_2 = (m_1 + m_2) \mathbf{V}_C = \mathbf{p}_1$$



а) $m_1 < m_2$	$0 < \vartheta_1 \leq \pi$	$\theta > \pi/2$
б) $m_1 = m_2$	$0 < \vartheta_1 \leq \pi/2$	$\theta = \pi/2$
в) $m_1 > m_2$	$0 < \vartheta_1 \leq \vartheta_{1\text{макс}}$	$\theta < \pi/2$

Здесь  $\vartheta_{1\text{макс}}$  — предельный угол. Он определяется формулой

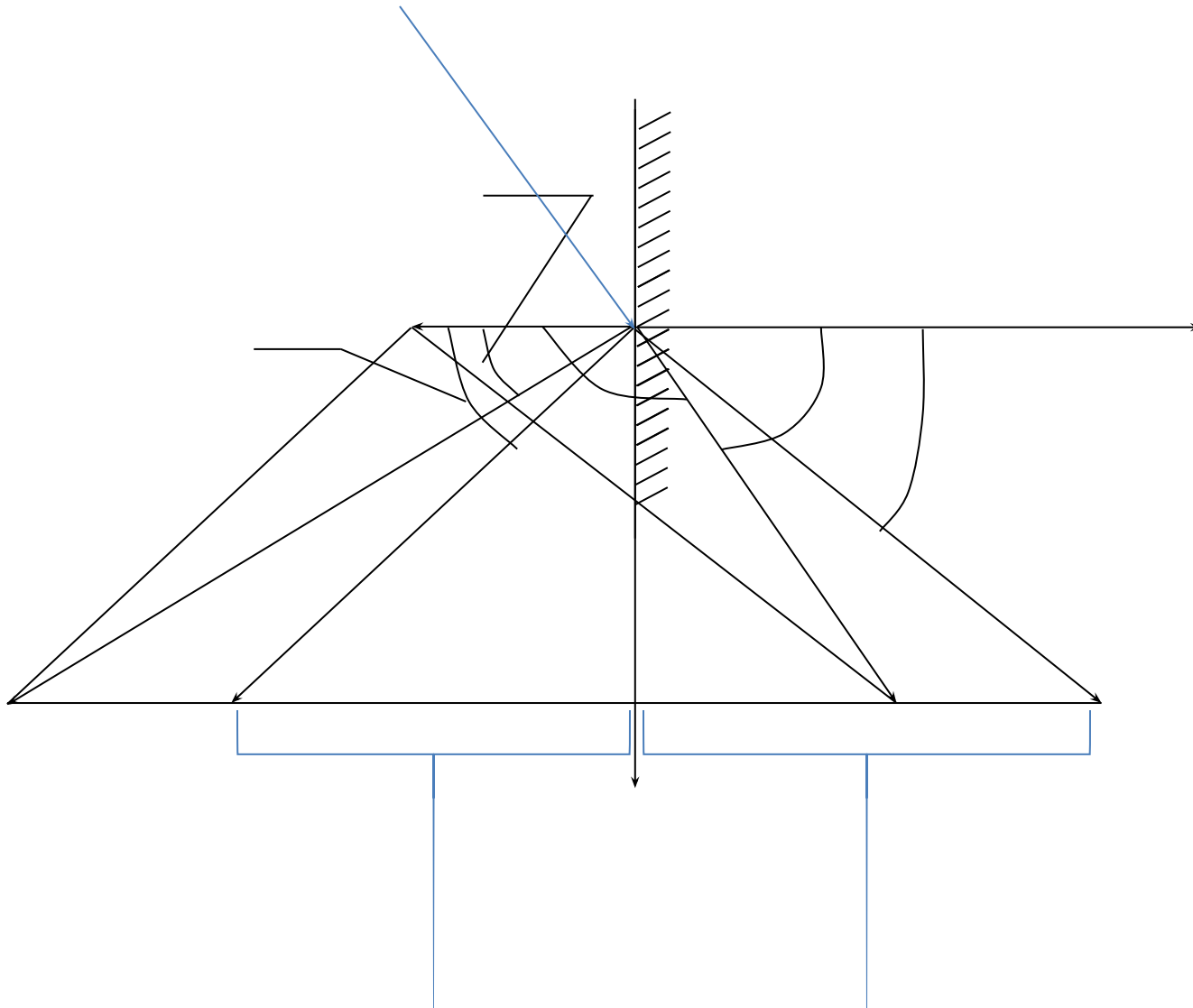
$$\sin \vartheta_{1\text{макс}} = m_2/m_1,$$

# Абсолютно упругий удар шара о массивную стенку – ДЗ-1

Адрес ДЗ 2 семестра

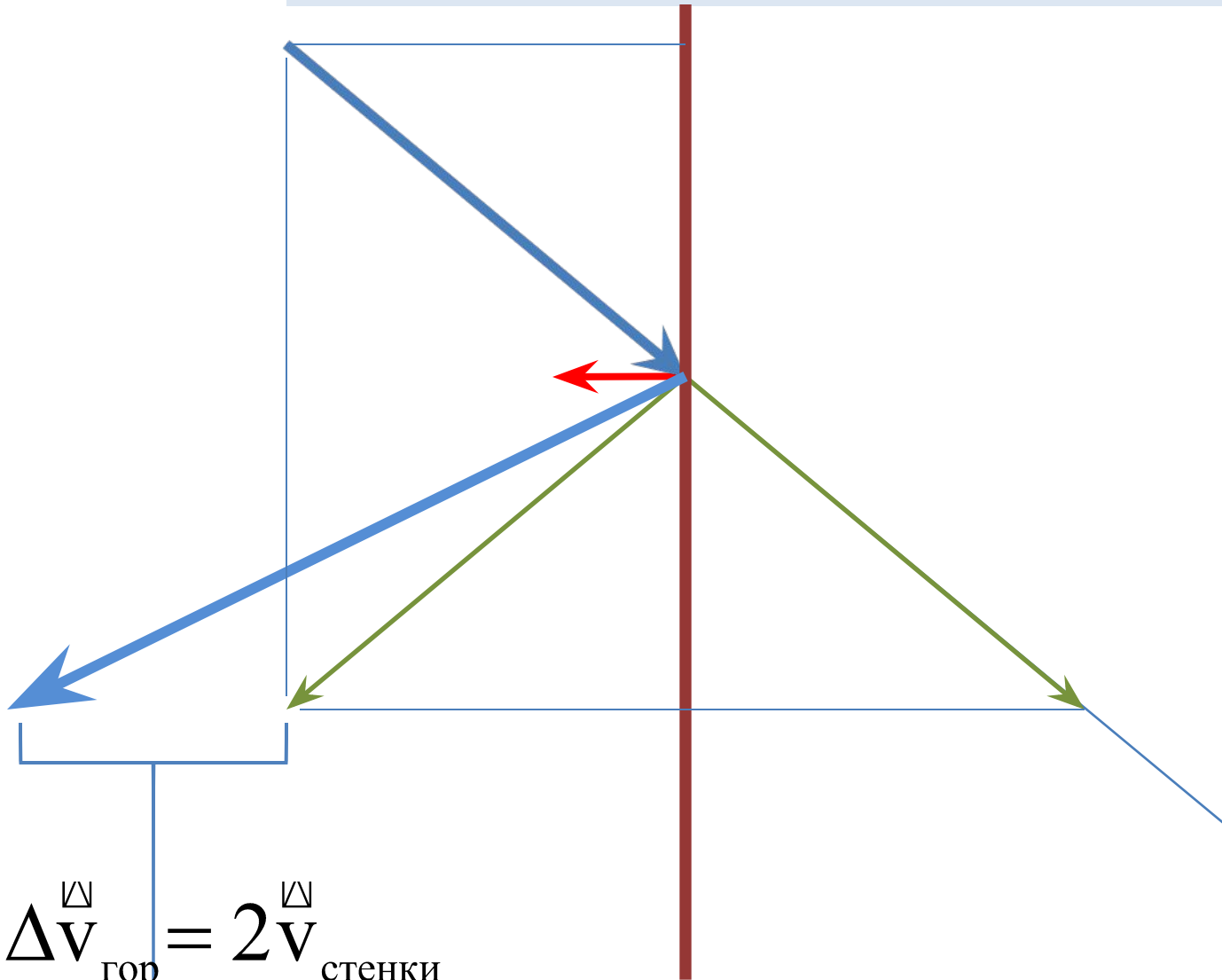
<http://fn.bmstu.ru/learning-work-fs-4/45-sem2/169-phys-dz-sem2>

# Пример со стенкой из ДЗ-1



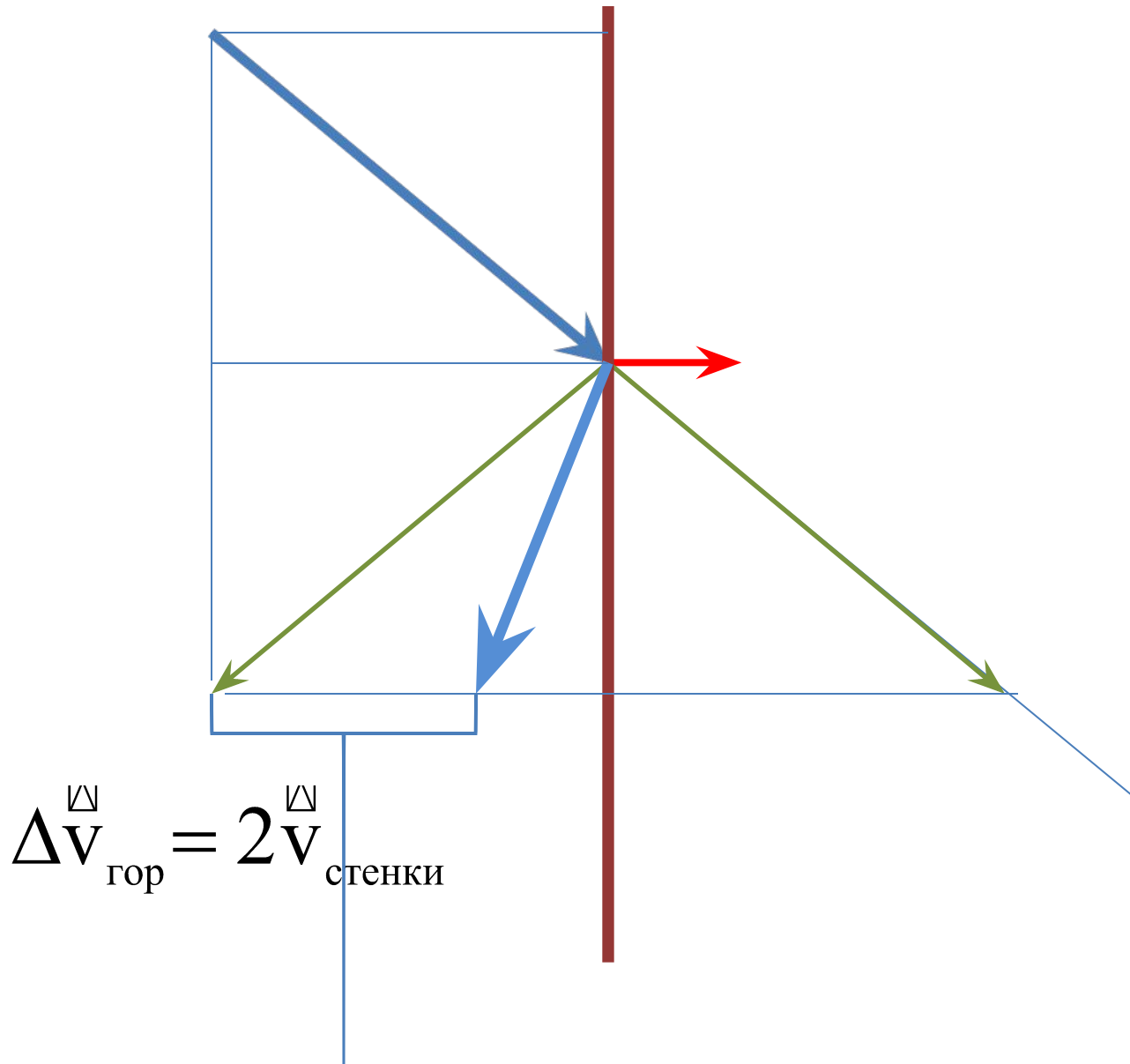
Включить сетку

# АУУ о подвижную стенку



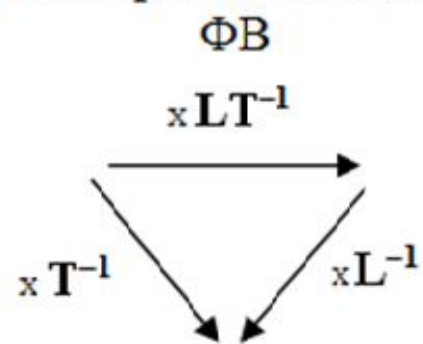
$$\Delta \vec{v}_{\text{гор}}^{\square} = 2 \vec{v}_{\text{стенки}}^{\square}$$

# АУУ о подвижную стенку



Далее факультативно

Размерностные связи  
ФВ



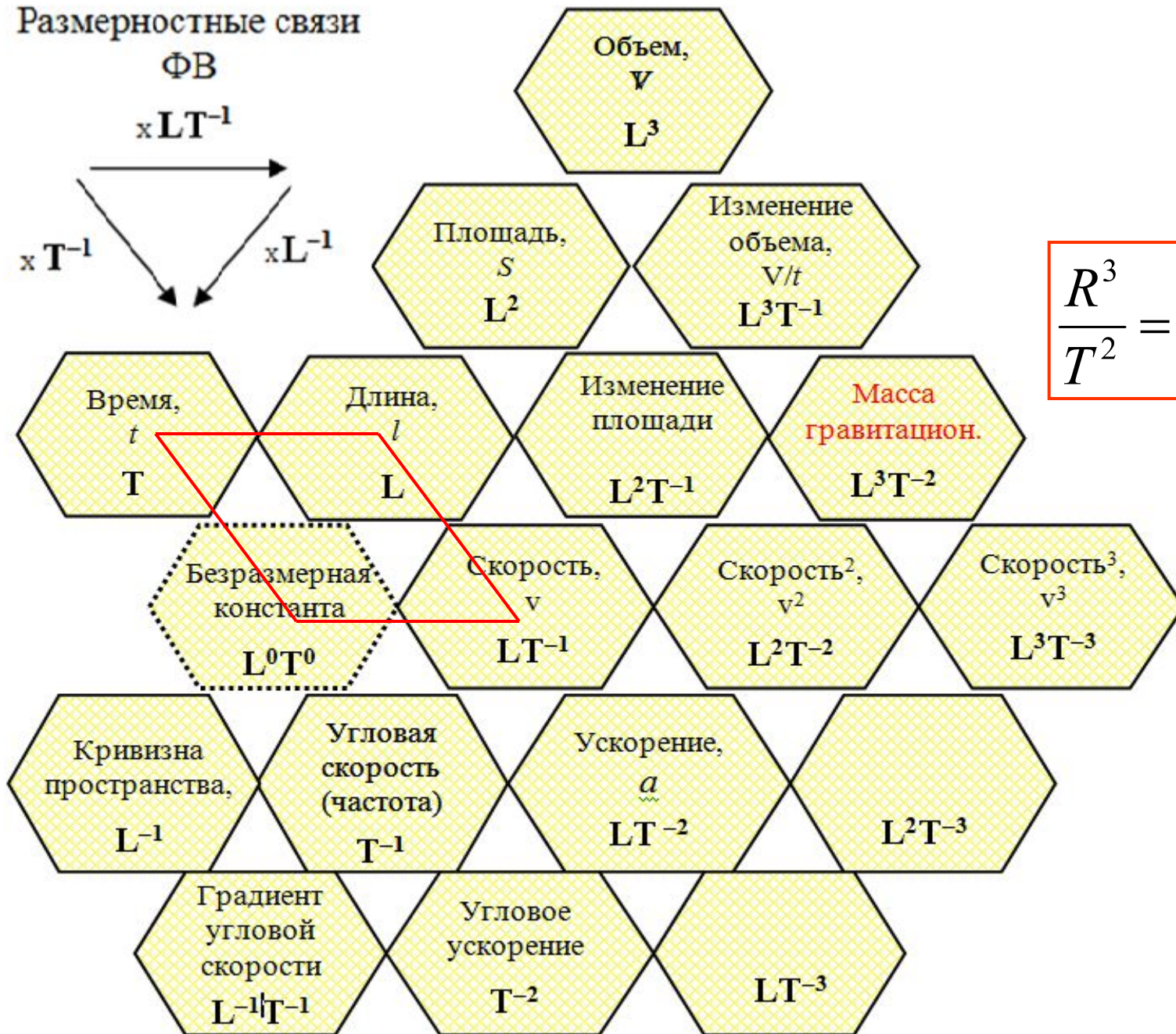
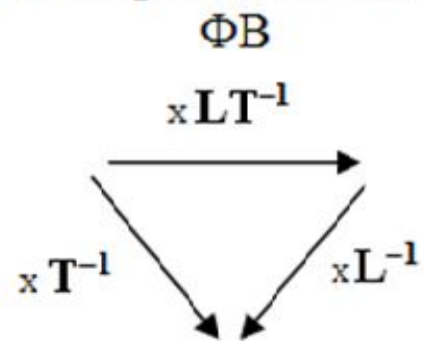
Система  
кинематических ФВ

$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{Gm_c}{4\pi^2}$$



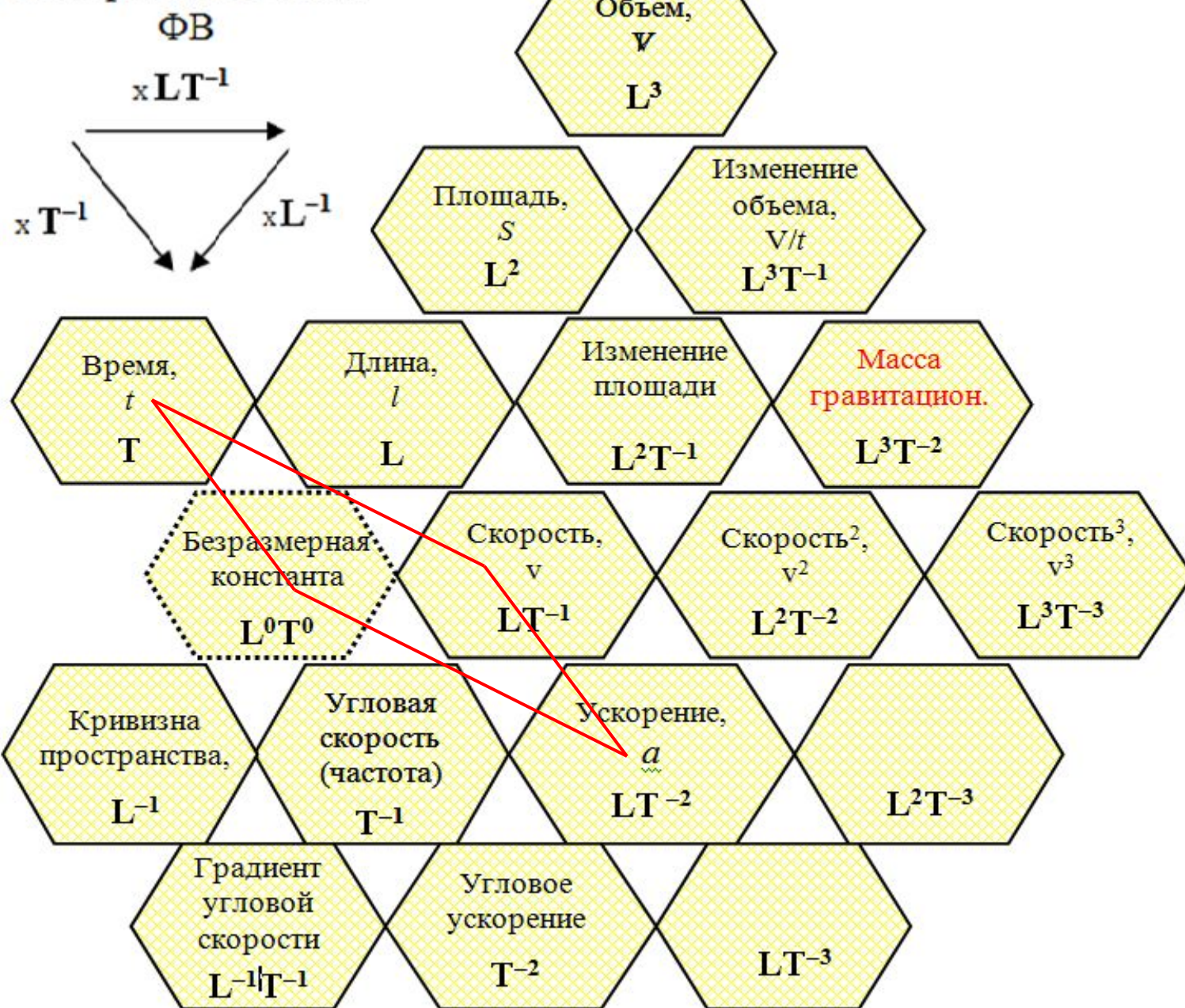


# Размерностные связи

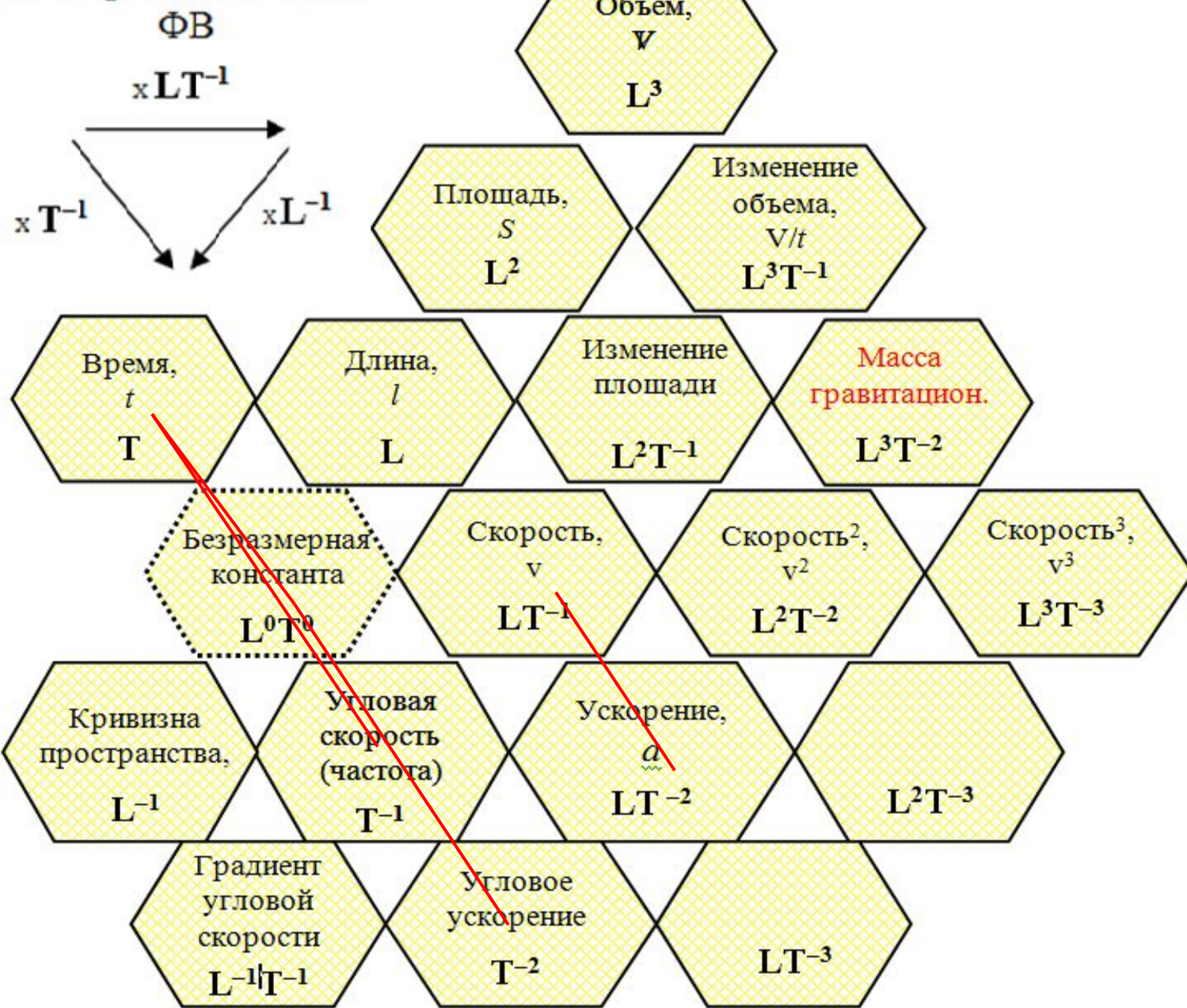


$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{Gm_c}{4\pi^2}$$

# Размерностные связи

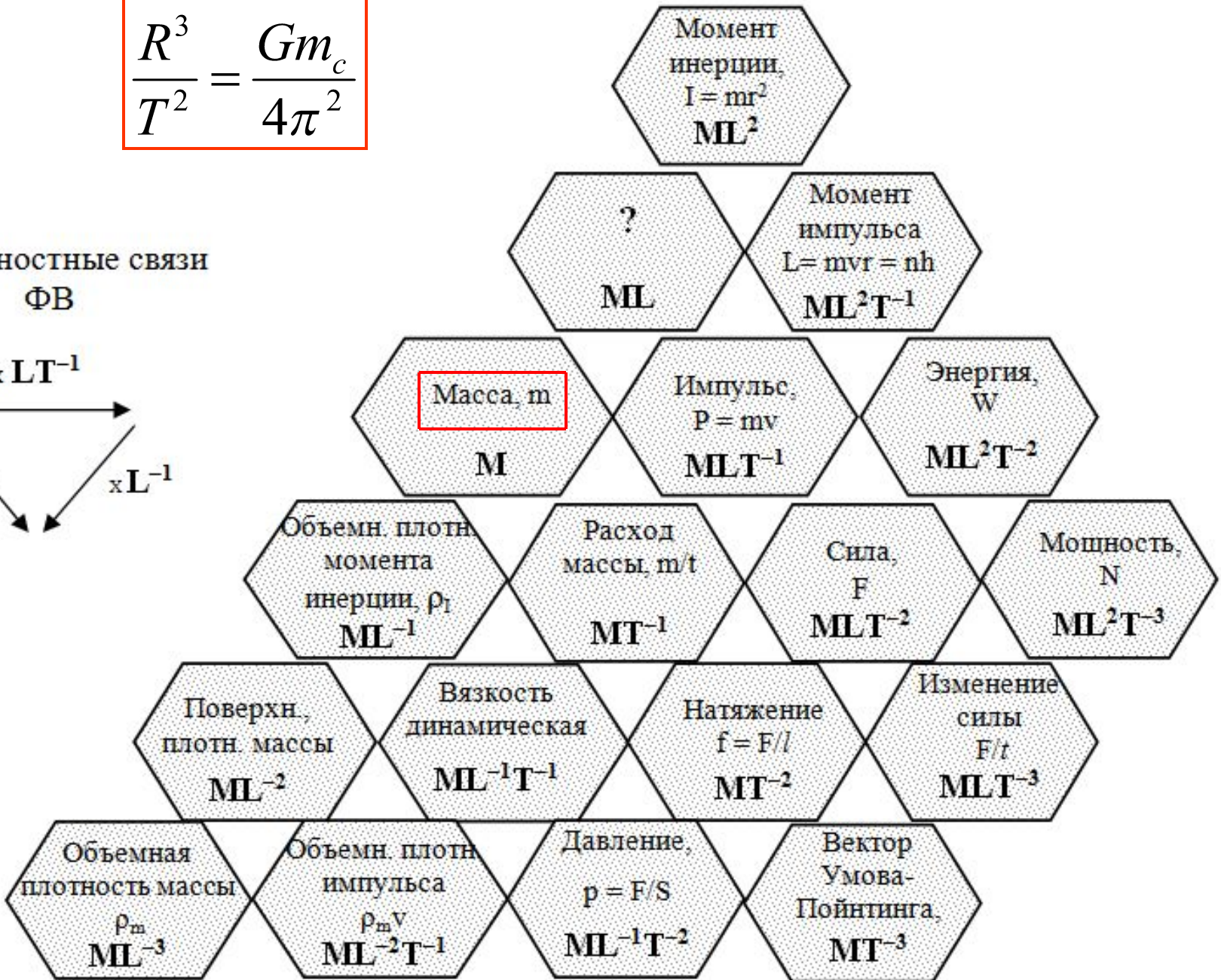
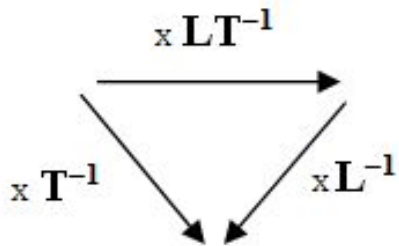


# Размерностные связи



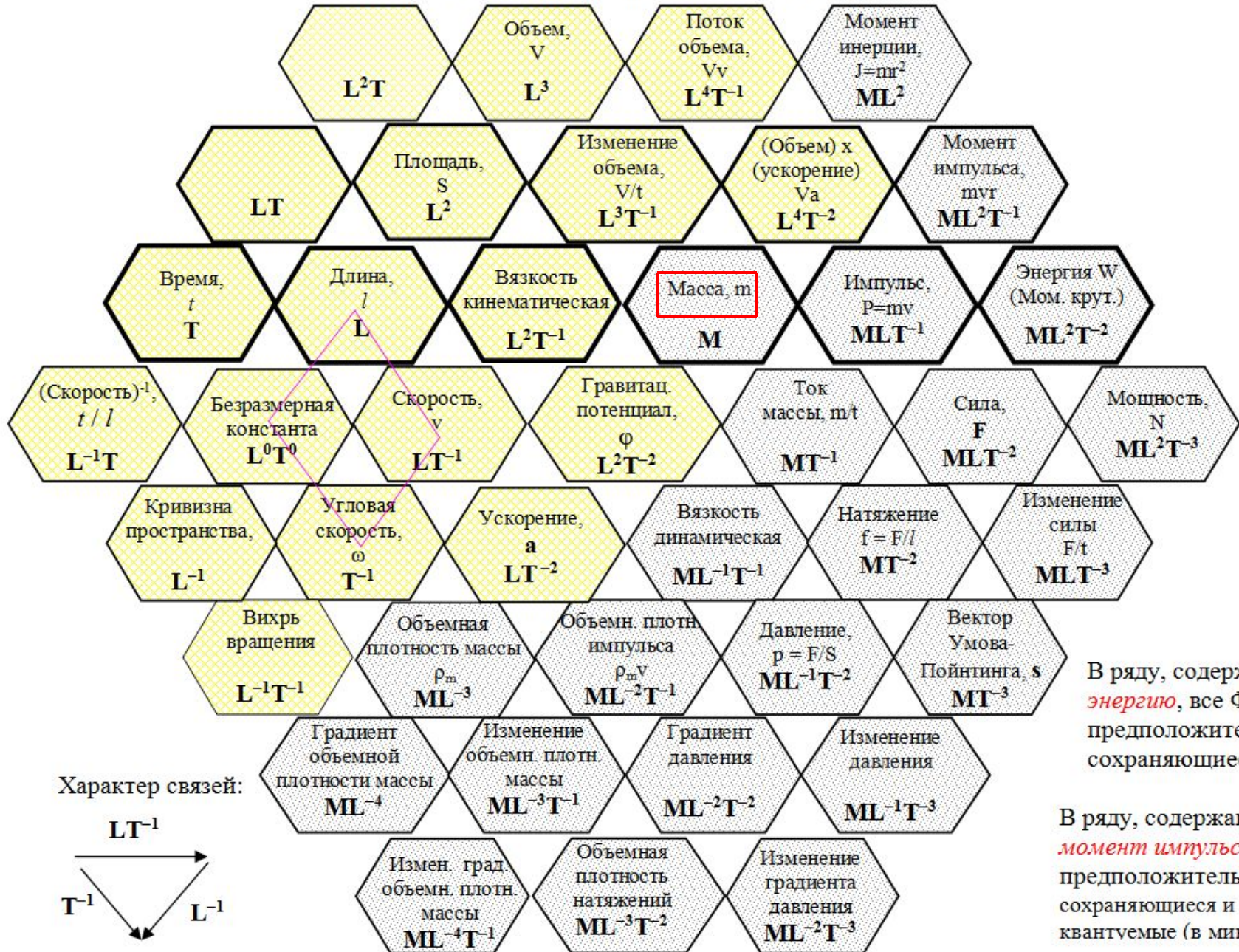
$$\frac{R^3}{T^2} = \frac{Gm_c}{4\pi^2}$$

Размерностные связи  
ФВ



# ОБЩИЕ БАЗОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

(Подразделяются на кинематические и динамические)

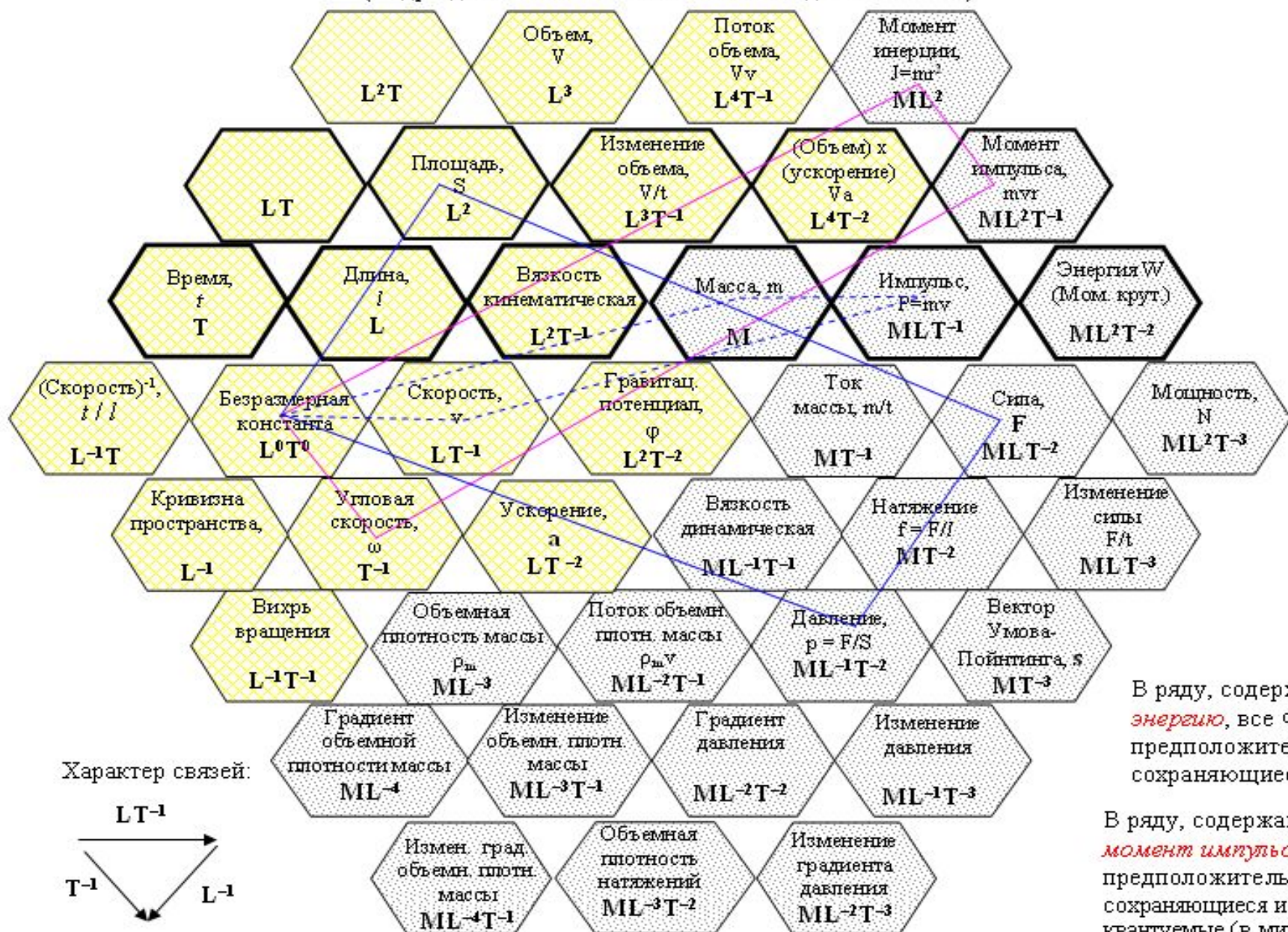


В ряду, содержащем **энергию**, все ФВ, предположительно, сохраняющиеся.

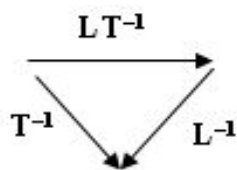
В ряду, содержащем **момент импульса**, все ФВ, предположительно, сохраняющиеся и квантовые (в микромире)

# ОБЩИЕ БАЗОВЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

(Подразделяются на кинематические и динамические)



Характер связей:



В ряду, содержащем *энергию*, все ФВ, предположительно, сохраняющиеся.

В ряду, содержащем *момент импульса*, все ФВ, предположительно, сохраняющиеся и квантуемые (в микромире)

# Архитектура многоуровневой системы физических величин и закономерностей (ФВиЗ)

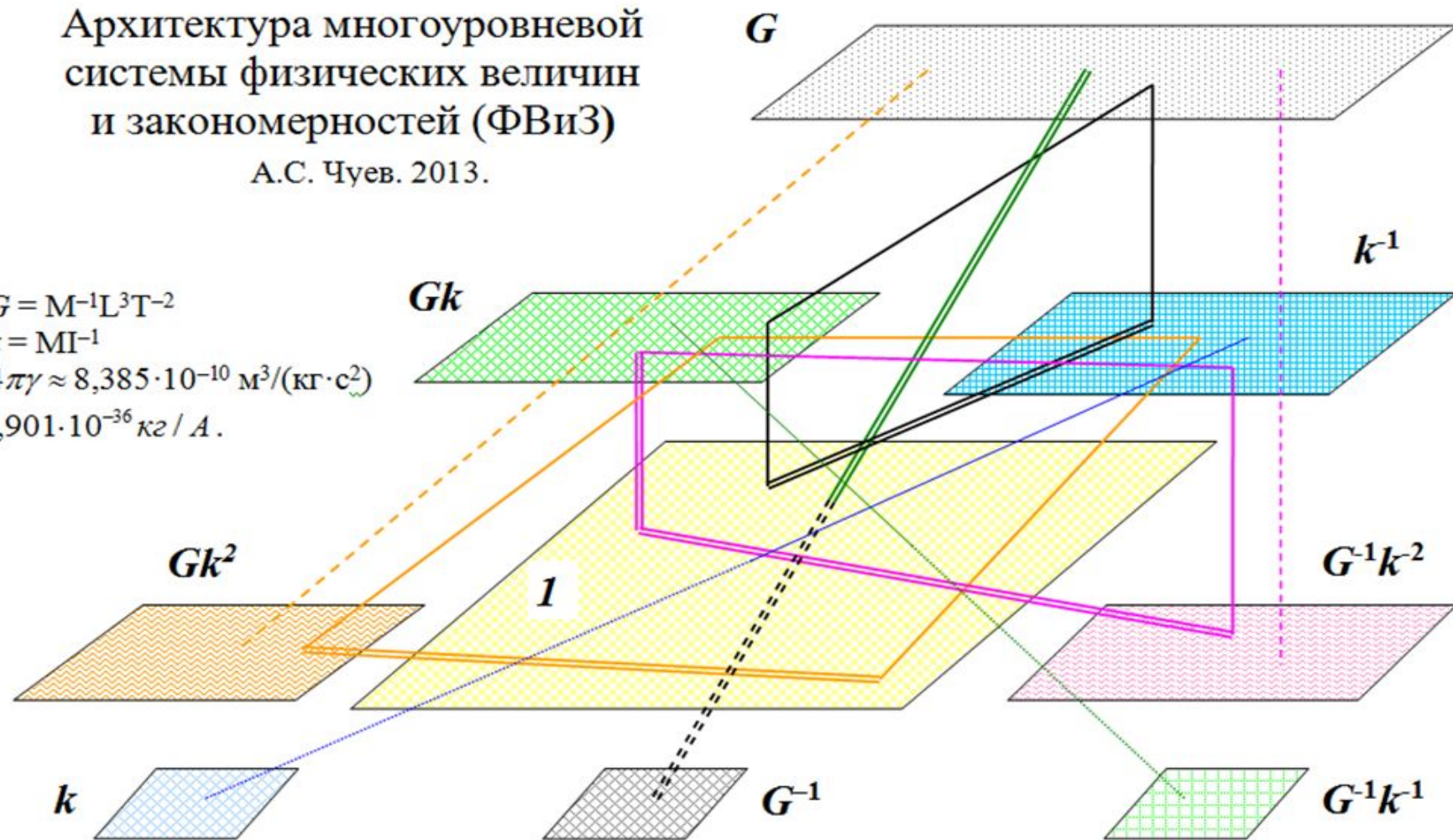
А.С. Чуев. 2013.

$$\dim G = M^{-1}L^3T^{-2}$$

$$\dim k = MI^{-1}$$

$$G = 4\pi\gamma \approx 8,385 \cdot 10^{-10} \text{ М}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$$

$$k \approx 4,901 \cdot 10^{-36} \text{ кг}^2 / \text{А}.$$



## Системные уровни и действующие межуровневые связи физических величин:

**1** - общие базовые кинематические величины

**G** - общие базовые динамические величины

**G<sup>-1</sup>** - уровень гравитационной константы

**Gk** - базовые электромагнитные величины

**k<sup>-1</sup>** - полевые электромагнитные величины

**Gk<sup>2</sup>** - структуро-средовые ЭМВ 1 подгруппы

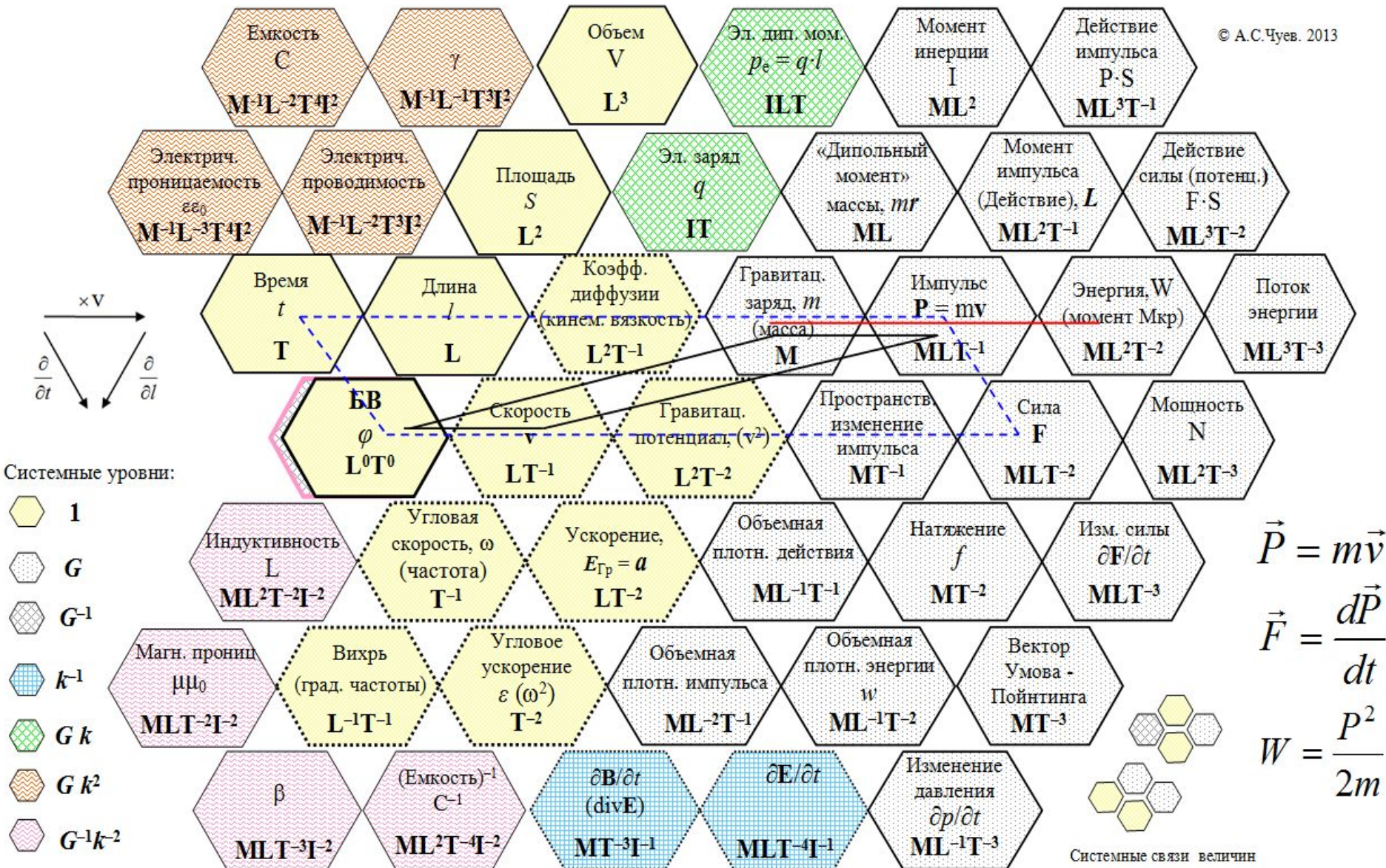
**G<sup>-1</sup>k<sup>-2</sup>** - структуро-средовые ЭМВ 2 подгруппы

**k** и **G<sup>-1</sup>k<sup>-1</sup>** - дополнительные системные уровни

# СИСТЕМА ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

## Импульс (количество движения) и его системны связи

© А.С.Чуев. 2013

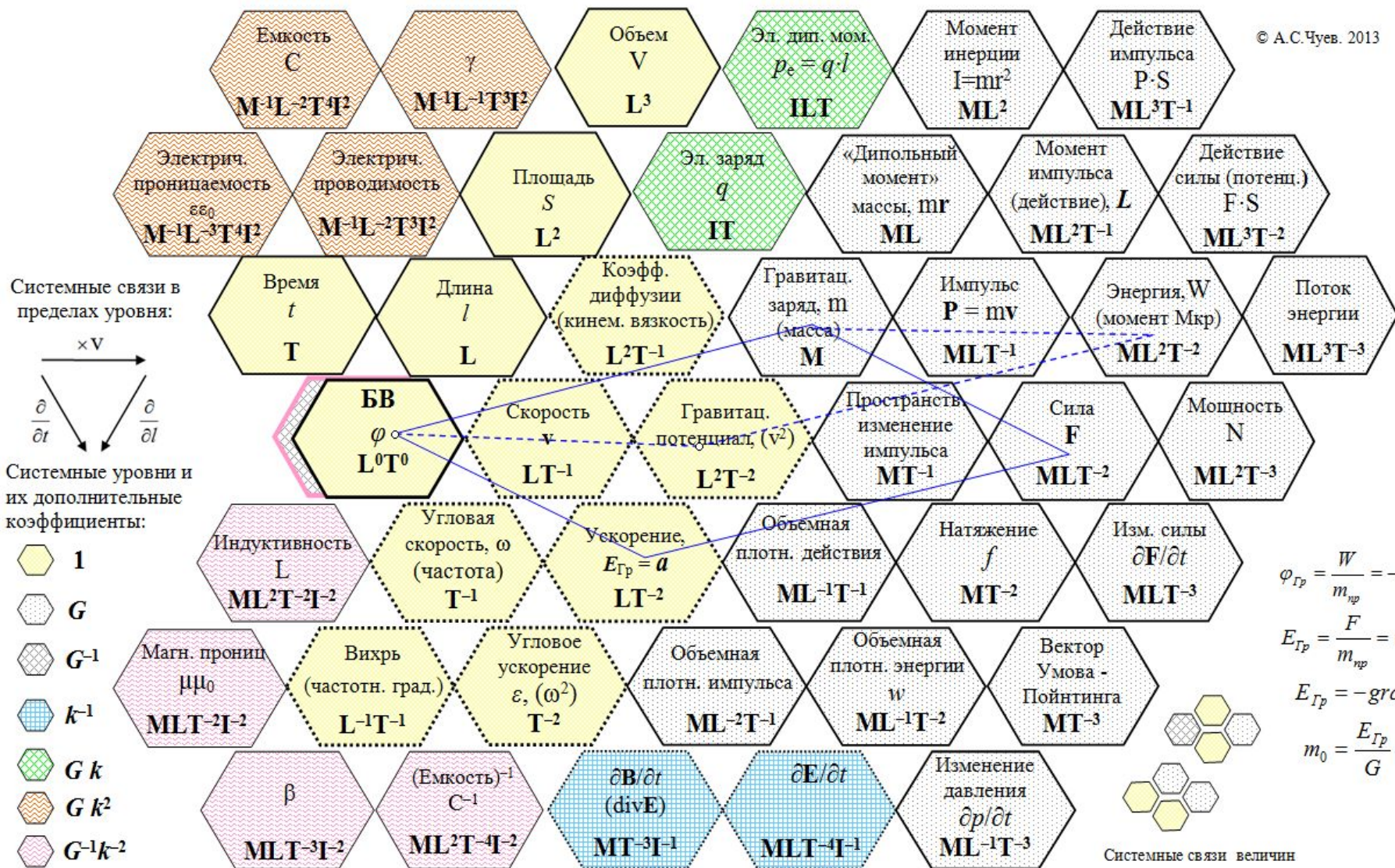




# СИСТЕМА ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ

(с визуализацией важнейших механических и гравитационных величин)

© А.С.Чуев. 2013



$$\varphi_{Гр} = \frac{W}{m_{Гр}} = -G \frac{m_0}{4\pi r}$$

$$E_{Гр} = \frac{F}{m_{Гр}} = G \frac{m_0}{4\pi r^2}$$

$$E_{Гр} = -grad \varphi_{Гр}$$

$$m_0 = \frac{E_{Гр}}{G} 4\pi r^2$$

Конец лекции 2-2017