***Сегодня: пятница, 7 октября 2022 г.***

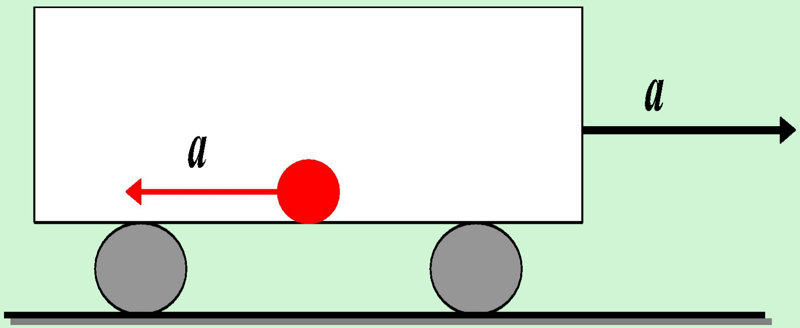
# Лекция 6

# *Понятие о неинерциальных системах отсчета*

# Неинерциальные СО

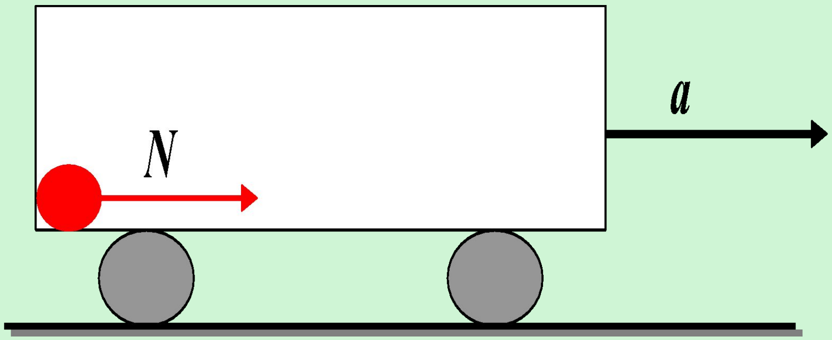
**Неинерциальные СО** – системы отсчёта, движущиеся относительно инерциальных систем отсчета с ускорением.

- Геоцентрическая система отсчета (жёстко связанная с Землёй) в общем случае является неинерциальной вследствие суточного вращения Земли.
- Максимальное ускорение точек Земли не превосходит 0,5 %*g*. Следовательно, в большинстве практических задач геоцентрическую СО считают инерциальной.




Поезд двинулся с ускорением $a$, шарик приобрёл ускорение $a$.

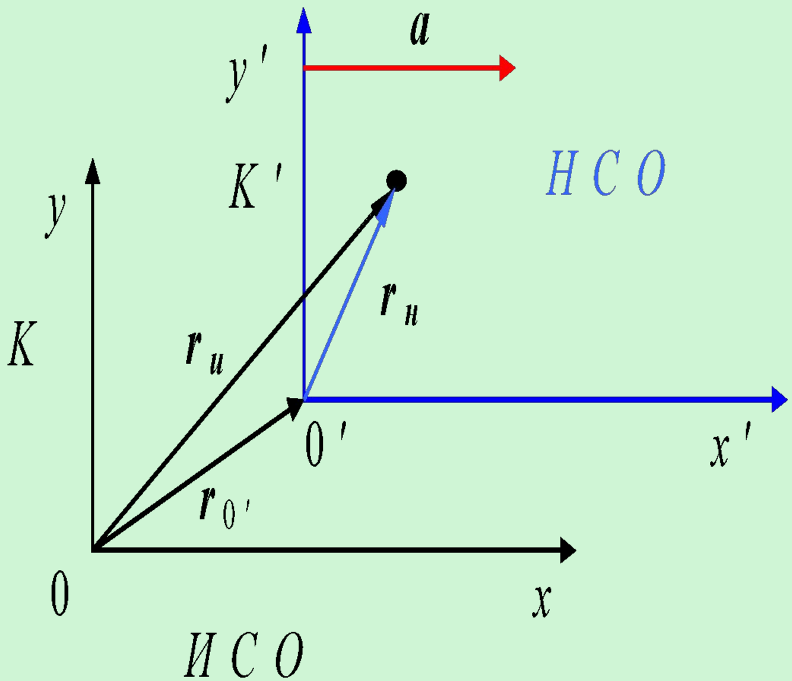
В неинерциальных СО ***первый закон Ньютона*** нарушается: тело получает ускорение без взаимодействия с другими телами.




Поезд движется с ускорением, шарик у стенки, на него действует сила реакции опоры ***N***, но шарик находится в покое.

В неинерциальных СО ***второй закон Ньютона*** нарушается: при наличии взаимодействия тело не получает ускорение.

# Принцип Даламбера




В момент $t = 0$ системы $K$ и $K'$ совпадают.

Система $K'$ начинает двигаться относительно $K$ с ускорением $\boldsymbol{a}$.

В момент $t$:

$$\vec{v}_{0'} = \vec{a}t; \quad \vec{r}_{и} = \vec{r}_{0'} + \vec{r}_{н}, (1)$$

$r_{и}$ – радиус-вектор материальной точки в системе $K$,

$r_{н}$ – радиус-вектор материальной точки в системе $K'$,

$r_{0'}$ – радиус-вектор начало координат системы $K'$ в системе $K$.

Продифференцируем уравнение (1) по времени:

$$\frac{d\vec{r}_и}{dt} = \frac{d\vec{r}_{0'}}{dt} + \frac{d\vec{r}_н}{dt}, (2) \quad dt = dt'.$$

$$\vec{v}_и = \vec{v}_{0'} + \vec{v}_н. (3)$$

$$\frac{d\vec{v}_и}{dt} = \frac{d\vec{v}_{0'}}{dt} + \frac{d\vec{v}_н}{dt}, (4) \quad \vec{v}_{0'} = \vec{a}t \Rightarrow$$

$$\vec{a}_и = \vec{a} + \vec{a}_н, (5) \Rightarrow \vec{a}_н = \vec{a}_и - \vec{a}, (6)$$

$a_н$ – ускорение материальной точки относительно НСО,

$a_и$ – ускорение материальной точки относительно ИСО,

$a$ – ускорение НСО относительно ИСО.

$$m\vec{a}_н = m\vec{a}_и - m\vec{a}, (7)$$

$m\vec{a}_и = \vec{R}$ – векторная сумма сил взаимодействия,

$-m\vec{a} = \vec{J}$ – сила инерции.

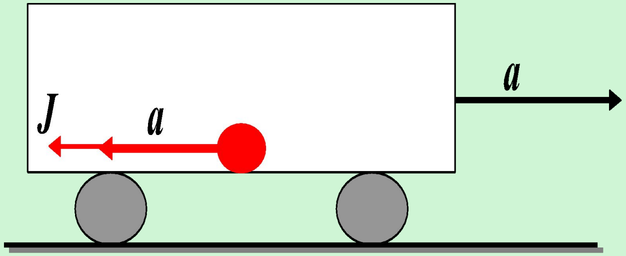
$$m\vec{a}_н = \vec{R} + \vec{J} (7) - принцип \quad Даламбера.$$

**Произведение массы тела на его ускорение относительно НСО равно векторной сумме сил взаимодействия сложенной с силой инерции.**

# Сила инерции

**Сила инерции** – фиктивная сила в том смысле, что она не обусловлена взаимодействием с другими телами, а вызвана ускоренным движением НСО относительно ИСО.

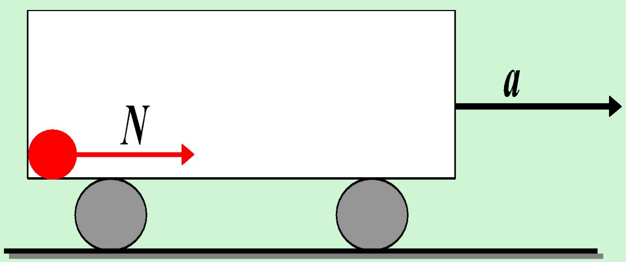
Т.к. сила инерции обусловлена ускоренным движением системы отсчёта относительно другой СО, то она не подчиняется ***третьему закону Ньютона***.




$$\vec{a}_и = \vec{a}_н + \vec{a}, \quad m\vec{a}_и = m\vec{a}_н + m\vec{a} \Rightarrow$$

$$m\vec{a}_н = \underbrace{m\vec{a}_и}_{R} \underbrace{- m\vec{a}}_{J}.$$

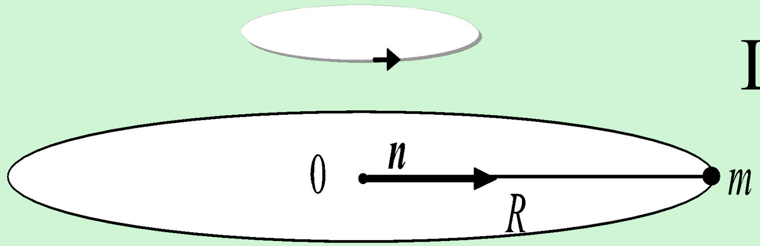
$$\frac{\vec{J}}{m} = -\vec{a}.$$




$$\left|\vec{J}\right| = \left|\vec{N}\right|, \quad \vec{J} = -m\vec{a}.$$

$$m\vec{a}_н = \vec{R} + \vec{J}.$$

# Сила инерции
# во вращающихся системах отсчёта




Центробежная сила инерции во вращающихся СО зависит от местоположения тела в СО.

***n*** **– единичный орт.**

$$m\vec{a}_{н} = m\vec{a}_{и} + m\vec{a}_{J}, \quad \vec{J} = -m\left(\vec{a}_{и} - \vec{a}_{н}\right).(1)$$

Тело *m* покоится относительно диска (НСО), т.е. вращается вместе с диском

$$\left.\begin{aligned} \vec{a}_{н} &= 0,(2) \\ \vec{a}_{и} &= -\omega^{2}R\vec{n}.(3) \end{aligned}\right\} \quad \begin{aligned} &\vec{J} = m\omega^{2}R\vec{n}, \quad \vec{R} = R\cdot\vec{n} \Rightarrow \\ &J_{ц.б} = m\omega^{2}R.(4) \end{aligned}$$

***центробежная сила инерции.***

## Свойства центробежной силы:

1) величина центробежной силы инерции (*Fц.б*) зависит от положения тела во вращающейся СО,

2) величина *Fц.б* не зависит от скорости тела относительно вращающейся СО,

3) *Fц.б* является консервативной.

$$dA = \vec{F}_{ц.б} d\vec{R}; \quad dA = m\omega^2 \vec{R} \cdot d\vec{R}.$$

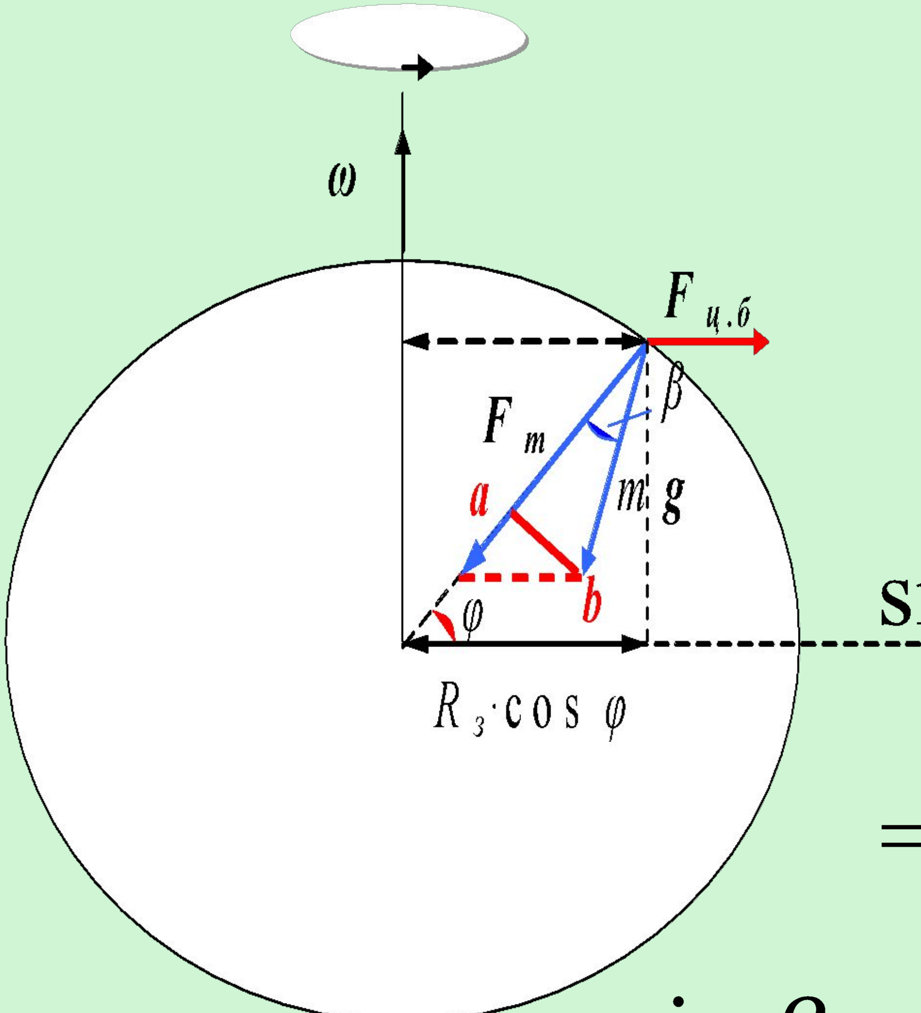
$$\vec{R} \cdot d\vec{R} = \frac{d\vec{R}^2}{2}, \quad \vec{R}^2 = \vec{R} \cdot \vec{R} \cos \angle \vec{R}, \vec{R} = R^2, \quad \frac{dR^2}{2} = R \cdot dR.$$

$$dA = m\omega^2 R \cdot dR.$$

$$A_{12} = \int_{R_1}^{R_2} m\omega^2 R \cdot dR = \left. \frac{m\omega^2 R^2}{2} \right|_{R_1}^{R_2} = \frac{m\omega^2 \left(R_2^2 - R_1^2\right)}{2},$$

**т.е. не зависит от формы пути.**

Из-за $F_{ц.б}$ направления $F_{тяжести}$ и $F_{тяготения}$ не совпадают.



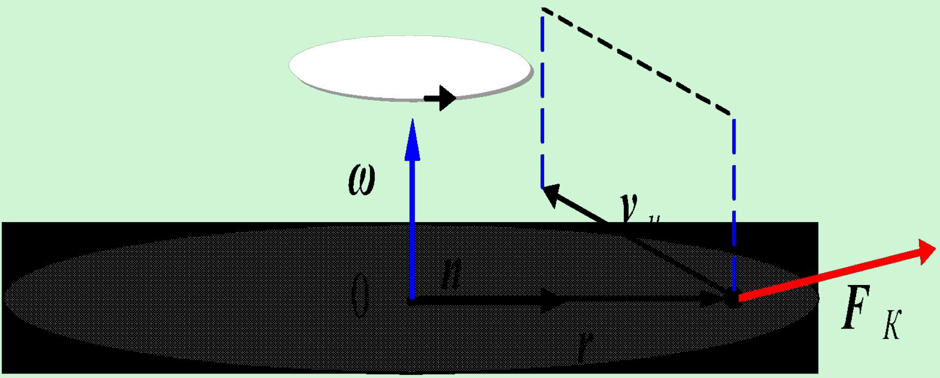

$$|ab| = mg\sin\beta,$$

$$|ab| = F_{ц.б}\sin\varphi = $$
$$= m\omega^2 R_з \cos\varphi \sin\varphi.$$

$$\sin\beta = \frac{\omega^2 R_з \cos\varphi\sin\varphi}{g} =$$
$$= \frac{\omega^2 R_з \sin 2\varphi}{2g}.$$

$$\sin\beta = 0{,}0018\sin 2\varphi.$$

# Сила Кариолиса




$\boldsymbol{v}_{н}$ – скорость движения материальной точки относительно вращающейся СО – НСО, направление $\boldsymbol{v}_{н}$ произвольное.

На эту точку действует сила, обусловленная инерцией

$$\left|\vec{F}_{К}\right| \sim v_{н} \cdot \omega \sin \underbrace{\angle \vec{v}_{н}, \vec{\omega}}_{90^{0}} = v_{н} \cdot \omega.$$

**Скорость точки относительно ИСО:**

$$\vec{v}_{и} = \vec{v}_{н} + \vec{v} = \vec{v}_{н} + [\vec{\omega}, \vec{r}]. (1)$$

$$\vec{J} = -m(\vec{a}_{и} - \vec{a}_{н}). (2)$$

Пусть $\vec{v}_{н} \uparrow\uparrow \vec{v}$.

$$\vec{a}_{и} = -\frac{\vec{v}_{и}^{\,2}}{r}\vec{n} = -\frac{v_{и}^2}{r}\vec{n} = -\frac{(v_{н} + \omega r)_{и}^2}{r}\vec{n}. (3)$$

$$\vec{a}_{н} = -\frac{\vec{v}_{н}^{\,2}}{r}\vec{n} = -\frac{v_{н}^2}{r}\vec{n}. (4)$$

$$\vec{J} = m\left(\frac{v_{н}^2}{r} + 2\frac{v_{н}\omega r}{r} + \frac{\omega^2 r^2}{r} - \frac{v_{н}^2}{r}\right)\vec{n} = m(2v_{н}\omega + \omega^2 r)\vec{n}.$$

$$\vec{J} = m\left(\frac{v_н^2}{r} + 2\frac{v_н \omega r}{r} + \frac{\omega^2 r^2}{r} - \frac{v_н^2}{r}\right)\vec{n} = m\left(2v_н\omega + \omega^2 r\right)\vec{n}.$$

$$\vec{F}_{ц.б} = m\omega^2 r\vec{n}.$$

$$\vec{F}_К = m2v_н\omega\vec{n}.$$

- В общем случае $\vec{F}_К = 2m\left[\vec{v}_н \cdot \vec{\omega}\right].$

  Если материальная точка движется во вращающейся СО со скоростью $\boldsymbol{v}_н$, то на материальную точку действует сила Кариолиса $\vec{F}_К = 2m\left[\vec{v}_н \cdot \vec{\omega}\right].$

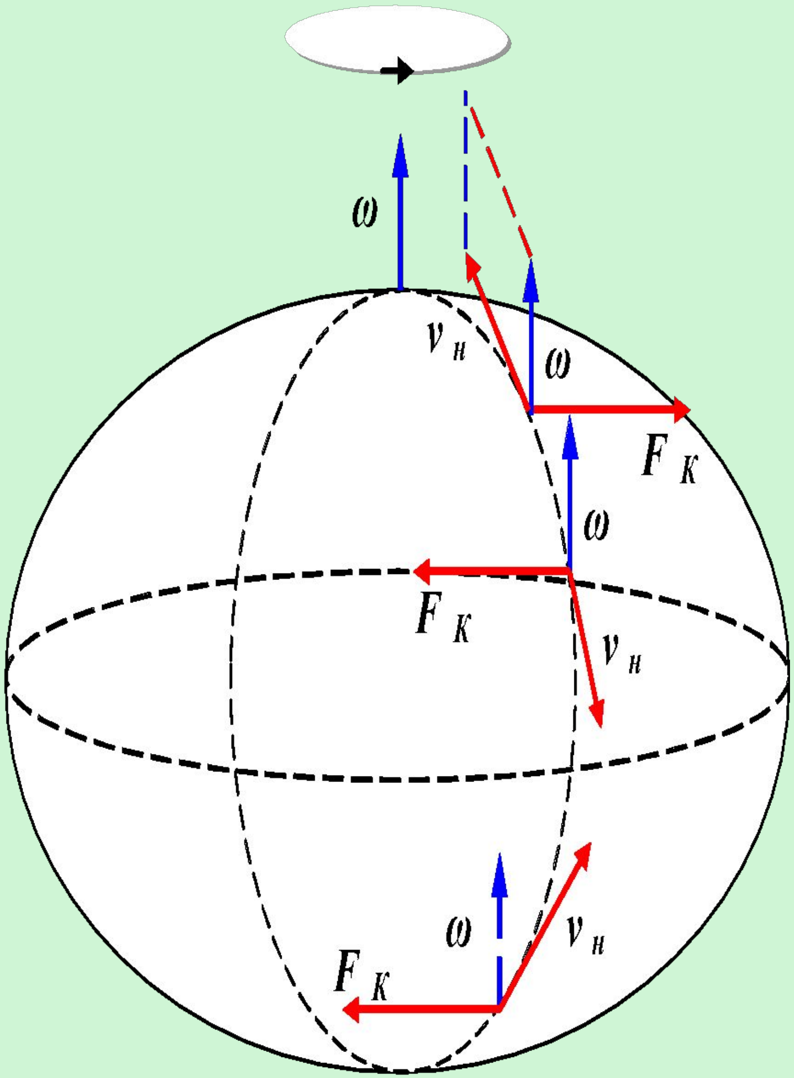
# Свойства силы Кариолиса:

1) величина $F_K$ не зависит от положения материальной точки во вращающейся СО,

2) величина $F_K$ зависит от скорости $\boldsymbol{v}$*н*,

3) $\vec{F}_K \perp \vec{v}_н$ $F_K \Rightarrow$ работы не совершает. Эта сила называется *гироскопической*.

# Закон Бэра




***В северном полушарии***

Если тело движется на север - $\boldsymbol{F_К}$ на восток,
если тело движется на юг - $\boldsymbol{F_К}$ на запад.

Следовательно, правый берег рек подмывается сильнее; правые рельсы железных дорог по движению изнашиваются сильнее.

***В южном полушарии***

$\boldsymbol{F_К}$ направлена влево по отношению к направлению движения $\boldsymbol{v_н}$.

# Гравитационное поле

Фундаментальные взаимодействия: электронное, гравитационное, сильное, слабое.

Гравитационное взаимодействие *универсальное*, т. е. возникает между любыми двумя материальными точками.

***Закон всемирного тяготения*:** между любыми двумя материальными точками действует сила взаимного притяжения прямо пропорциональная произведению масс этих точек и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними

$$\vec{F} = -\gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^3} \vec{r},$$

$$\gamma = 6{,}67 \cdot 10^{-11} \frac{Н \cdot м^2}{кг^2} - гравитац. \ \ пост.$$

Первая формулировка дана Ньютоном в 1687 г. в труде «Математические начала натуральной философии».

***Гравитационная масса*** – мера способности тел притягивать и притягиваться к другим телам.

Величину $\gamma$ оценил Ньютон. Более точно в 1797 г. определил Кавендиш с помощью крутильного маятника.

# Напряженность поля тяготения

Это векторная величина, численно равная силе, действующей на единицу массы, помещенную в данную точку поля и направленная вдоль действия силы (или совпадает с силой тяготения).

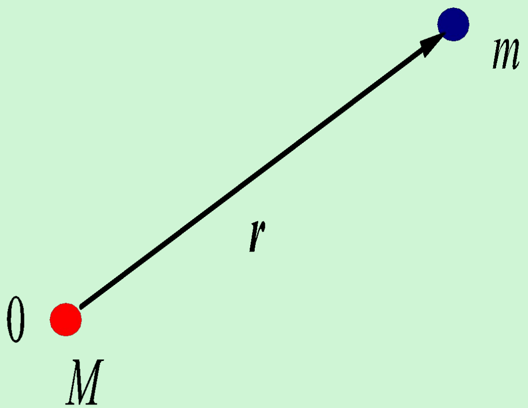
$$\vec{G} = \frac{\vec{F}}{m}; \quad \vec{G} = -\gamma \frac{M}{r^3}\vec{r}.$$

# Принцип суперпозиции

$$\vec{G} = \vec{G}_1 + \vec{G}_2 + \ldots + \vec{G}_n .$$

Если гравитационное поле создано системой материальных точек (гравитационных масс), то результирующая напряженность поля равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых в этой точке каждой материальной точкой.

# Работа в гравитационном поле




$$dA = \vec{F}d\vec{r}; \quad dA = -\gamma \frac{m \cdot M}{r^3}\vec{r}d\vec{r},$$

$$\vec{r}d\vec{r} = \frac{1}{2}d\left(\vec{r}^{\,2}\right) = \frac{1}{2}d\left(r^2\right) = rdr. \Rightarrow$$

$$dA = -\gamma \frac{m \cdot M}{r^3}rdr = -\gamma \frac{m \cdot M}{r^2}dr.$$

$$A_{12} = -\int_{r_1}^{r_2} \gamma \frac{m \cdot M}{r^2}dr = \gamma \frac{m \cdot M}{r}\Bigg|_{r_1}^{r_2} = \gamma mM\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right). (1) \Rightarrow$$

**Гравитационные силы *консервативные*.**

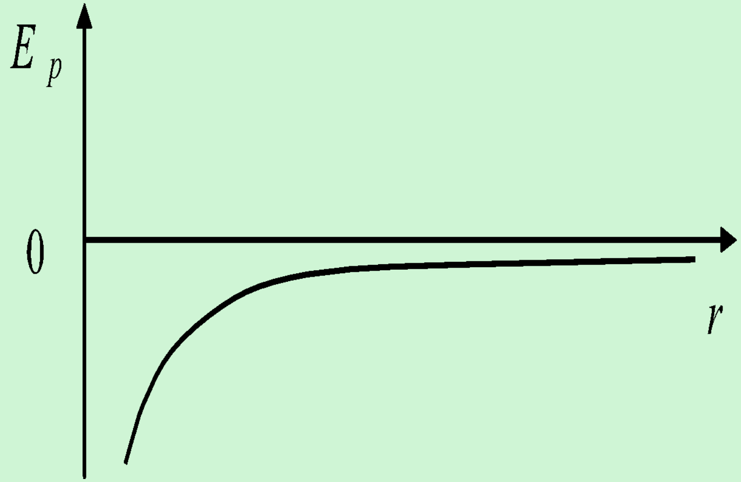
## *Потенциальная энергия в поле тяготения.*

$$dA = -dE_p.$$

$$A_{12} = -\left(E_{p2} - E_{p1}\right) = E_{p1} - E_{p2}.(2)$$

Сравнивая уравнении (1) и (2), запишем

$$E_{p1} = -\gamma \frac{mM}{r_1}, \quad E_{p2} = -\gamma \frac{mM}{r_2}.$$



# Потенциал поля тяготения

$$\varphi = \frac{E_p}{m} = -\gamma \frac{M}{r}; \quad M - \textit{точечная масса}.$$

Потенциал поля тяготения в данной точке равен потенциальной энергии тела единичной массы, помещенного в данную точку поля.

Принцип суперпозиции: $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + ... \varphi_n$.

Если гравитационное поле создано системой точечных масс, то потенциал результирующего поля в данной точке равен алгебраической сумме потенциалов, созданных в этой точке каждой из точечных масс по отдельности.

# Эквипотенциальные поверхности

Геометрическое место точек, потенциал которых одинаков, называется *эквипотенциальной поверхностью* или *поверхностью равного потенциала*.

Для точечных масс – сфера.

Связь напряженности и потенциала поля тяготения: $\vec{G} = -grad\varphi.$

# «Взвешивание» (определение массы) Солнца, Земли, планет

$$F_{тяготения} = F_{ц.б}.$$

$$\gamma \frac{mM}{R^2} = ma_{ц.б}, \quad a_{ц.б} = \frac{v^2}{R} = \left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 \frac{1}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

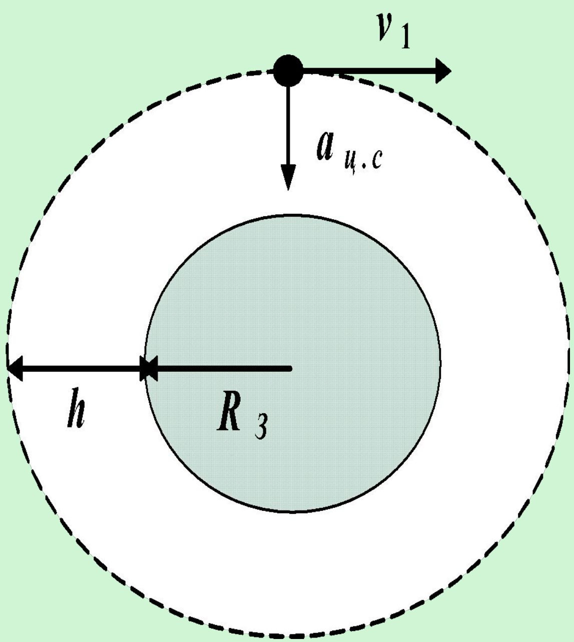
$$\gamma \frac{mM}{R^2} = m \frac{4\pi^2 R}{T^2} \Rightarrow M = \frac{4\pi^2 R^3}{\gamma T^2},$$

$M$ – масса Солнца,

$R$ – расстояние между Землёй и Солнцем,

$T$ – период обращения Земли вокруг Солнца.

# Космические скорости




**Первая** космическая скорость (круговая) – минимальная скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло двигаться вокруг Земли по круговой орбите. Становится искусственным спутником Земли.

Движение финитное.

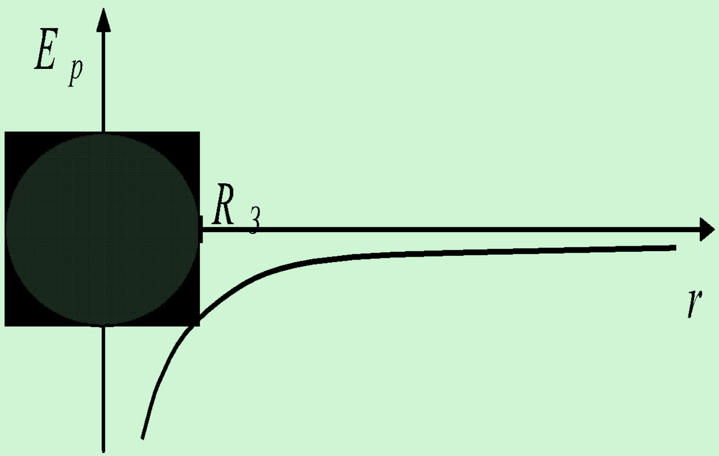
$$\vec{F}_m = m\vec{a}_{ц.с}.(1)$$

$$\gamma \frac{mM}{(R_з + h)^2} = \frac{mv_1^2}{R_з + h}; \quad h << R_з \Rightarrow \quad \gamma \frac{M}{R_з} = v_1^2,(2)$$

$$\vec{F}_m = gm = \gamma \frac{mM}{R_з^2}.$$

$$(2) \Rightarrow v_1 = \sqrt{\underbrace{\gamma \frac{M}{R_{\text{З}}^2}}_{g} \cdot R_{\text{З}}} = \sqrt{gR_{\text{З}}} = 7{,}9\,\frac{\text{км}}{\text{с}}.$$

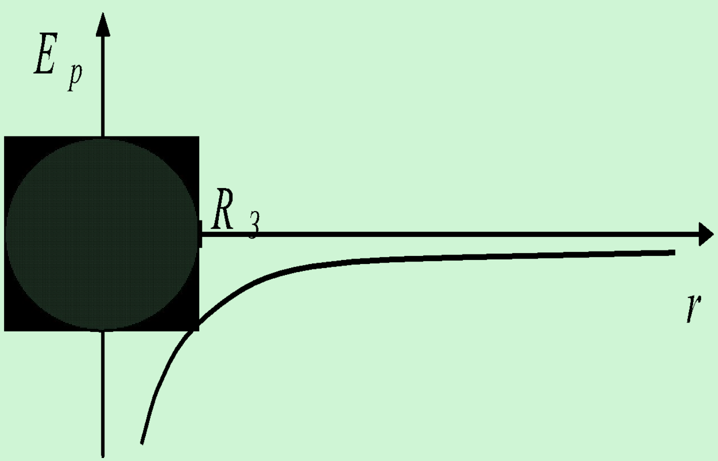
**Вторая** космическая скорость (параболическая) – минимальная скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно могло преодолеть притяжение Земли и стать искусственным спутником Солнца, т.е. его орбита в поле тяготения Солнца будет параболической.




Потенциальная энергия на большом расстоянии от Земли стремится к 0.

Кинетическая энергия должна быть равна работе ($\Delta Ep$), совершаемой против сил тяготения.

$$\frac{mv_2^2}{2} = \gamma \frac{mM_з}{R_з} \Rightarrow v_2 = \sqrt{2\gamma \frac{M_з}{R_з^2} \cdot R_з} = \sqrt{2gR_з} = 11{,}2\,\frac{км}{с}.$$



**Третья** космическая скорость – скорость, которую надо сообщить телу, чтобы оно преодолело притяжение Солнца и покинуло пределы Солнечной системы.

$v_3$ =16,7 км/с.

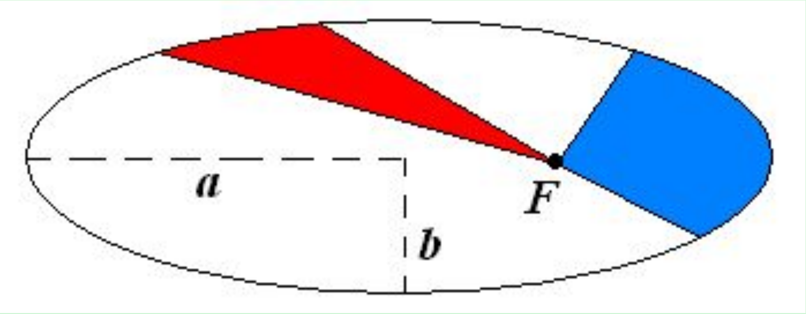
# Законы Кеплера.
# Законы движения планет

Описывают движение тел в центральном поле, каковым является поле тяготение.

Кеплер (1571 – 1630 гг.) уточнил результаты наблюдений датского астронома Браге (1546 – 1601 гг.)

1. Планеты Солнечной системы вращаются по эллипсам, в одном из фокусов которых находится Солнце.

2. Радиус-вектор планет за равные промежутки времени описывает одинаковые площади.




3. Квадраты периодов обращения планет вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей их орбит.

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Для круговых орбит $a = R$.

Законы Кеплера являются следствием законов Ньютона.

Например, третий закон Кеплера. Для частного случая движения планет по круговой орбите.

Для планеты 1: масса Солнца $$M = \frac{4\pi^2 R_1^3}{\gamma T_1^2}.$$

Для планеты 2: масса Солнца $$M = \frac{4\pi^2 R_2^3}{\gamma T_2^2}.$$

$$\frac{R_1^3}{T_1^2} = \frac{R_2^3}{T_2^2} \Rightarrow \frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{R_1^3}{R_2^3} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

# Чёрные дыры

**Чёрные дыры** – космические объекты, поглощающие все частицы, в том числе фотоны, проходящие через их поверхность.

Если фотон поглощается, то его кинетическая энергия меньше (равна) его потенциальной энергии в поле чёрной дыры. Следовательно,

$$\underbrace{\frac{mc^2}{2}}_{E_{к\ фотона}} \le \gamma \frac{mM}{r},$$

$M$ – масса чёрной дыры,

$r$ – радиус чёрной дыры.

Если $$r \le \gamma \frac{2M}{c^2},$$

то свет не может покинуть данный классический объект.

Т.к. чёрные дыры поглощают всё и почти ничего не испускают, то о существовании чёрных дыр можно судить по косвенным данным – поглощению вещества и испусканию в этом процессе излучения.