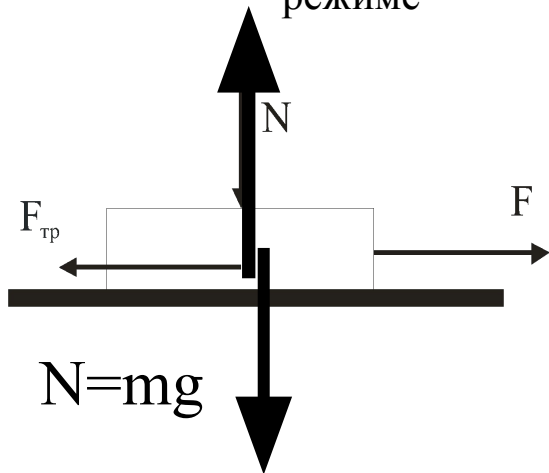
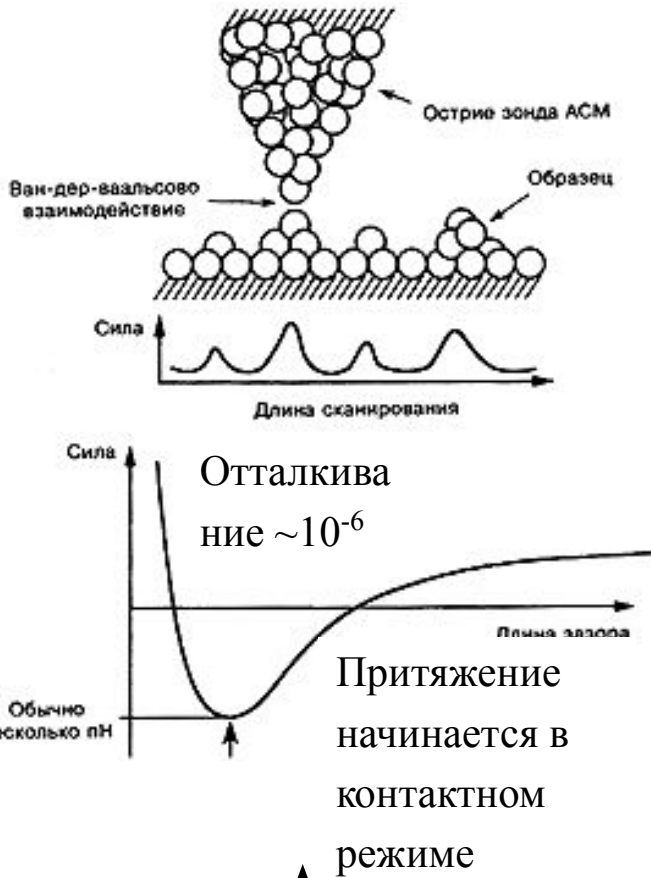


Есть две силы химическая и относительно далеко-действующая Ван дер Ваальса

# Силы трения

Существует сухое и жидкое трение. **Законы трения установлены Леонардом да Винче около 5 веков назад.** Сила  $F$  уравнивается равной ей по величине и противоположно направленной силой, которая и есть сила трения покоя  $F_{тр}$ . Сил трения покоя для данных поверхностей много, но макс. сила только одна  $F_{тр. max} = F_{тр. ск.}$  и именно через нее и определяется безразмерным коэфф. пропорциональности называемым **коэфф. трения скольжения  $\mu$** . Закон Amontons' (1699): модуль вектора  $F_{тр. ск.}$  **линейно пропорционален нагрузке (или реакции опоры  $N$ )** и практически **не зависит от модуля скорости** тела но направлен противоположно скорости.



$$\mu \approx \frac{F_{тр. max}}{N} \approx \frac{F_{тр. ск}}{N} \quad \mathbf{F}_{тр. ск} \approx -\frac{\mu \mathbf{N}}{v} \mathbf{v}$$

Точно равно если пренебречь Ван-дер-Ваальсом

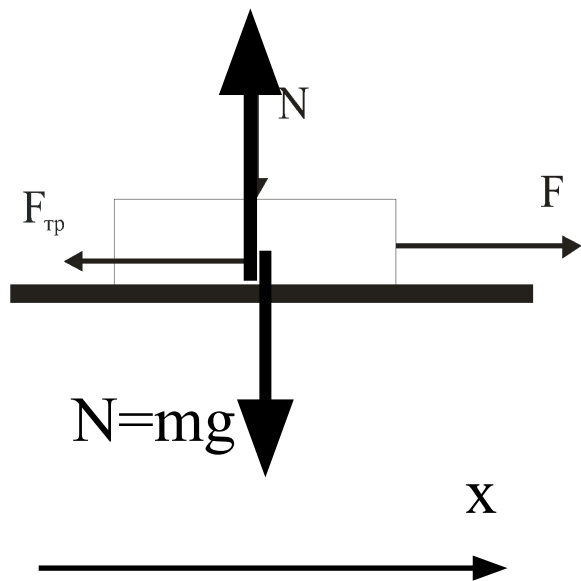
# Сила трения? Это много или мало?

- Если сил трения нет?

Человек не мог бы ходить!

- Чтобы космическому спутнику массой 650 кг поменять орбиту нужен двигатель, дающий в импульсе 5 гр (если она изменилась из за трения об остатки атмосферы)

# Сила трения сухого трения



Если горизонтальная поверхность т.е.  $\alpha=0$  ? проекция  $mg$  на горизонтальную ось  $x$  равна 0 и при начале скольжения  $ma_x = F - F_{\text{тр}} = F - \mu mg = 0$  или для баланса сил и обеспечения хотя бы нулевого ускорения (не нулевой начальной скорости)  $a = (F/m - \mu g) = 0$  или  $F/m = \mu g$  или  $F = \mu mg$ . **Сила  $F$  линейна пропорциональна массе тела.** Сила с которой надо тянуть на санях одного и двух студентов отличаются в два раза. **А для троих надо тройку запрягать!**

Но из опыта: **сила трения не зависит от площади соприкосновения.** **Посмотрим на трибометр. Почему?**  $F_{\text{тр}}$  определяется химией поверхностей и силой которая их сдавливает. Чем меньше площадь при той же величине силы сдавливания, тем больше давление на 1 мм кв. и больше атомов входят в химическое взаимодействие. **Трибометр с двумя брусками. Сила возрасла в 2 раза! Противоречие?** Т.е. для начала движения надо чтобы  $mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha = mg(\sin \alpha - \mu \cos \alpha) = 0$  или  $\mu = \tan \alpha$ ! Т.е. угол наклона доски в момент сползания бруска определяется только величиной  $\mu$ , а не  $m$ . **А почему нет зависимости от скорости? Так как короткодейтвие (химия) . Сила действует только на маленьком расстоянии. Т.е. факт химическая молекула создана! При малых скоростях с какой скоростью она создавалась не важно. Важно, что в один и тот же момент времени есть определенное количество молекул состоящих в химической связи. Химия в десять раз сильнее Ван-дер-Ваальсовых сил.**

# Сила трения

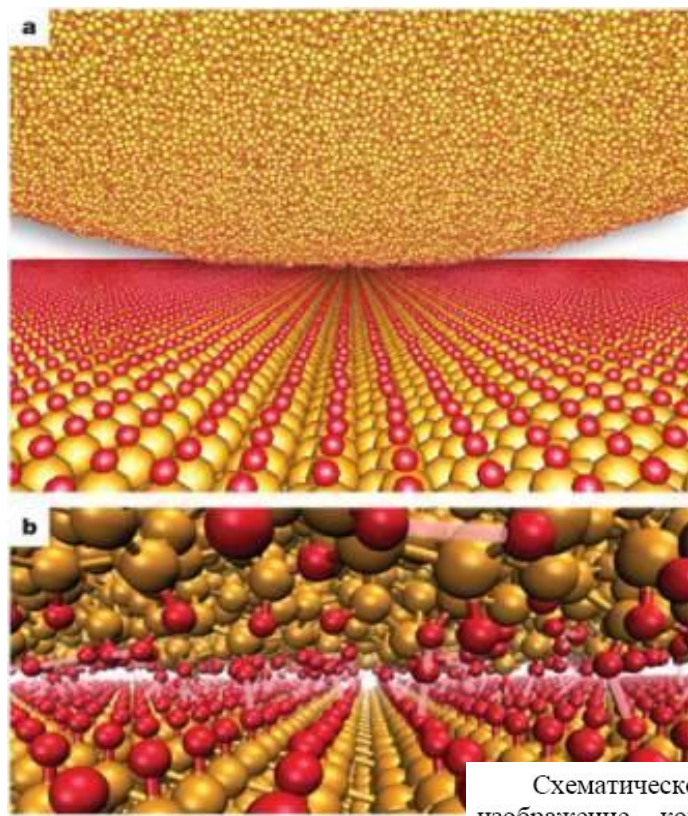
- Брусок на столе и шарик. Не путать коэфф. трение **скольжения** (безразмерен) и **качения** (определяемого как отношение момента силы трения качения к нормальной силе и имеющего размерность длины). То, что коэфф. **трения качения** очень мал используется в **подшипниках**. Трение качения ничтожно мало и резко возрастает только при скоростях сравнимых со скоростью распространения деформации в теле тогда лучше переходить на трение скольжения.
- **Автомобилистам:** Кинетическая энергия в результате действия сил трения переходит в тепловую и энергию деформации (поэтому тормозные диски и колодки на машинах в основном греются (при плавном торможении) и изнашиваются (при резком). Насколько чаще надо менять тормозные колодки у внедорожника в сравнении с Ладой ?
- Направление силы трения между ведущими (связанными с двигателем) и ведомыми колесами прямо противоположны. На полном приводе в одну. **Опыта с двумя тележками уже нет ;-(**
- Однако до 2009 года предсказать реальный коэфф. трения было невозможно точнее связать его со свойствами материала



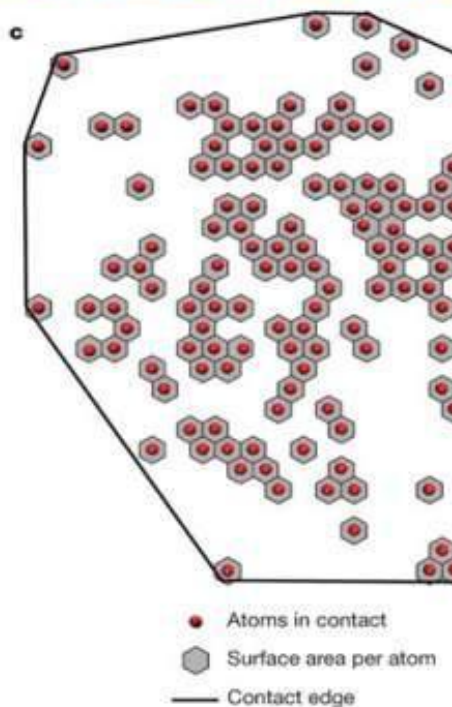
# Трения в макро- и наном мире похожи

Законы трения для наноструктур не отличаются от классических законов. Сухое трение **создается неровностями данных поверхностей, которые зацепляются друг за друга, а также силами взаимодействия между частицами, из которых состоят поверхности.**

Для наноповерхностей (совокупность молекул) рассчитывались силы межмолекулярного взаимодействия. Установлено, что **сила трения прямо пропорциональна количеству химически взаимодействующих атомов** - аналогу истинной (реальной) площади соприкосновения макрообъектов. **Сила трения прямо пропорциональна истинной площади (ее не следует путать с обычной площадью соприкосновения поверхностей тел).** Трущиеся наноповерхности можно рассматривать в рамках классических теорий трения поверхностей.



Схематическое изображение контакта между сферой из углерода и поверхностью алмаза, поверхность которого пассивирована водородом: *a* - общий вид, желтые атомы — углерод, красные — водород; *b* - сечение контактирующих поверхностей: показаны ковалентные связи между молекулами, а также силы отталкивания (обозначены розовым); *c* - контактирующие атомы (серые шестиугольники) и контур микрошероховатости [1].



# Трение или адгезия ?

## близкодействие или далекодействие?

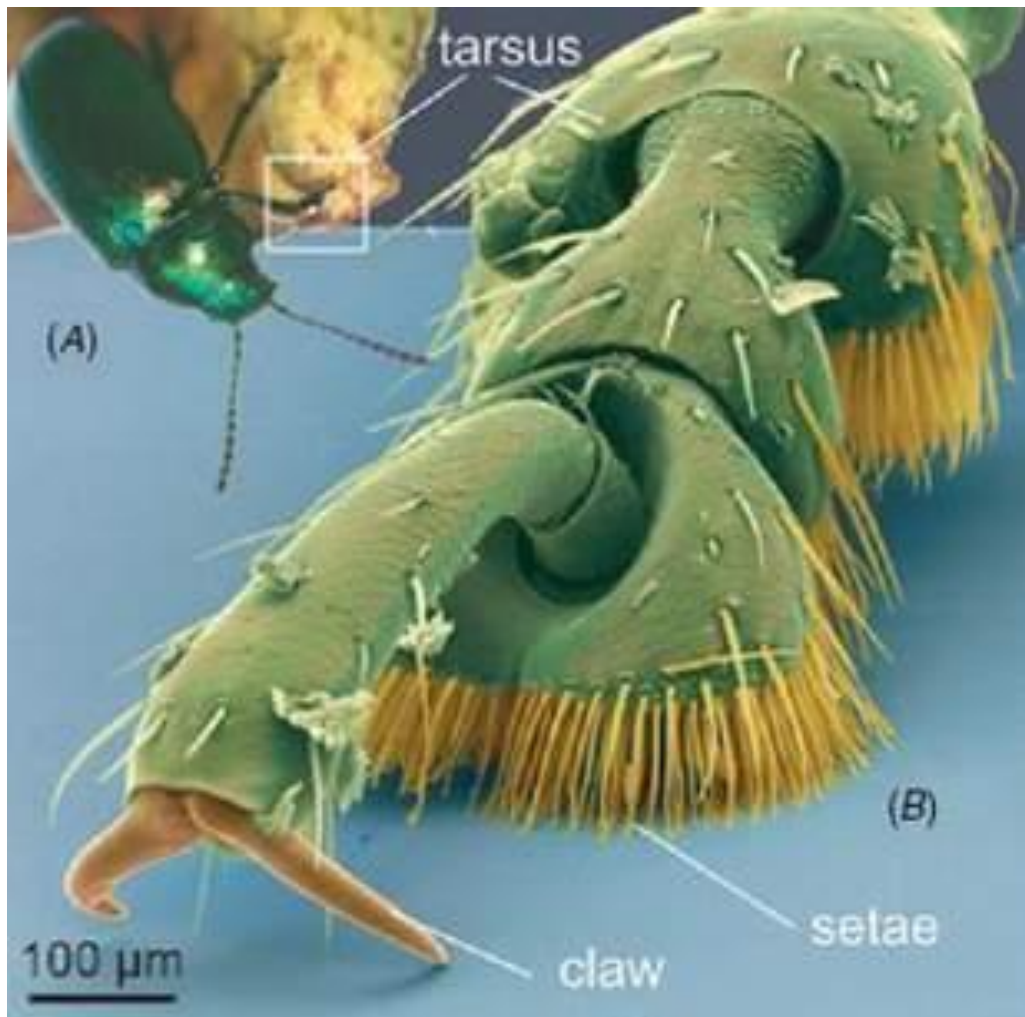
- **Преподаватель** : в чем принципиальное отличие сил трения от сил адгезии ? В том, что в трении участвуют только близкодействующие силы (химия), а Ван-дер-Ваальс не участвует ? В адгезии работают обе группы сил? или нет?

**Студент:** трение, обусловленное близкодействием, линейно зависит от веса тела, а трение с учетом Ван-дер-Ваальса ("далекодействующая адгезия") сублинейно.

- **Преподаватель** : правильно ли я понимаю, что адгезия включает и короткодействующие силы (химию) и Ван-дер-Ваальсовы?

**Студент** : да это так. Только короткодействующие силы, связанные с трением и такие же, связанные с адгезией, различаются (вторые можно устранить, например, пассивацией с помощью водорода, а первые, естественно, нет).

# Силы трения в животном мире



Когда миллионы волосков геккона (А) вступают в контакт с поверхностью (В), они все вместе создают мощную связь, которая в тысячу раз сильнее, чем та сила, которая нужна геккону, чтобы висеть на вертикальной стене.

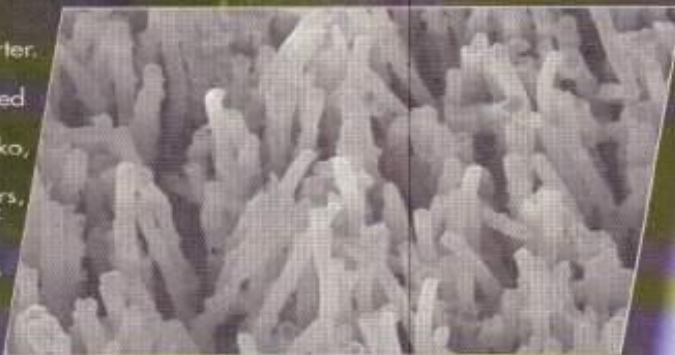
Ящерицы способны прочно прилипнуть к поверхности. И это тот механизм, который исследователям во всем мире еще только предстоит воспроизвести.





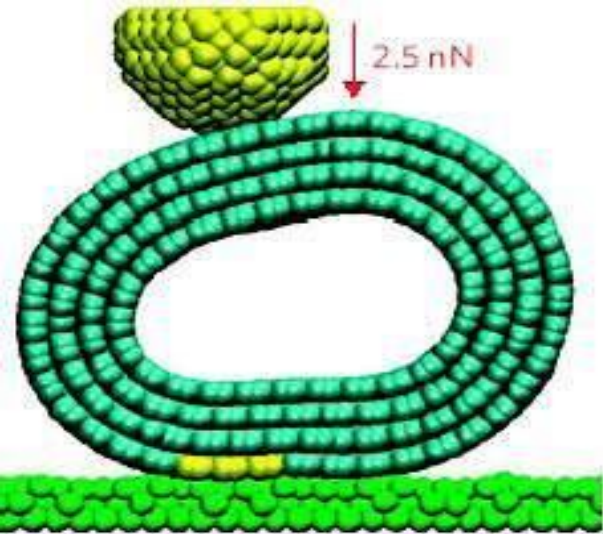
### High-friction microfibers

No adhesive is holding up this quarter. Instead, it is staying on the inclined glass plate because it has been coated with a high-friction array of microfibers. Taking their lead from the gecko, which can climb walls and traverse ceilings thanks to millions of small hairs, or *setae*, on its feet, Ronald Fearing of the University of California, Berkeley, and his colleagues have created arrays of polypropylene fibers with lengths of about 20  $\mu\text{m}$  and diameters between 0.6 and 5.0  $\mu\text{m}$ . The individual fibers can flex, which allows them to make better contact with a surface than a flat polypropylene film does. As a result, the fiber arrays, like the one in the scanning electron micrograph, have a coefficient of friction more than an order of magnitude larger than bulk polypropylene's and comparable to that of tire rubber. Unlike many other high-friction materials, the fiber arrays demonstrate no measurable adhesion on smooth surfaces. (C. Majidi et al., *Phys. Rev. Lett.* **97**, 076103, 2006; photo courtesy of the Fearing Group, UC Berkeley.)



Полипропиленовые  
микроволокна  
(0.6-5) x20 микрон гораздо  
лучше контактируют со  
стеклом чем гладкая  
поверхность и коэффициент  
трения на порядок больше чем  
у объемного полипропилена.  
**Площадь не важна. Важно  
качество контакта со  
стеклом (физические  
свойства микроволокон).**  
**Адгезию измеряли ее нет т.е.  
все без клея.**





# Факультативно: Анизотропное трение на наноуровне

Измерение сила трения между иглой АСМ и боковой поверхностью многослойной углеродной нанотрубки показало, что линейная зависимость  $F_{\text{тр}}$  не выполняется, а вместо этого  $F_{\text{тр}} \sim N^{2/3}$ . Выяснилось, что для нанотрубок диаметром менее 10 нм **величина трения различается при движении иглы перпендикулярно и параллельно оси нанотрубки**. Моделирование взаимодействия иглы с нанотрубкой показало, что более сильное трение в перпендикулярном направлении связано с возникновением мягкой моды колебаний, которая эффективно “забирает” энергию поступательного движения иглы. Т.е. дополнительно тратится энергия на деформацию поверхности. Конечно надо изучать как влияют конкретная форма иглы, поверхностные дефекты и другие факторы.

*M.Lucas et al., Nature Mater. 8, 876 (2009). ПерсТ, 2009, т.16, вып. 22*

## Движении твердого тела в жидкой среде.

На тело в жидкости или газе действует сила сопротивления ( $F // \mathbf{v}$  и обусловлена вязким (жидким) трением) и подъемная сила ( $F \perp \mathbf{v}$  и  $\neq 0$  при отсутствие симметрии тела относительно линии движения) .

- Если в жидкость привести в движение то оно со временем затухнет! Значит между слоями есть трение. Назовем его **силами внутреннего трения или силами вязкости, а  $\eta$  - коэфф. внутреннего трения или динамической вязкости.** Кстати поток газа тоже затухнет . Слои жидкости или газа соприкасающиеся с телом «прилипают» к нему и двигаются вместе с телом вовлекая другие слои за счет сил вязкости. Возникает вязкое трение между этими слоями и остальными.
- Давление на разные участки тела разное. Результирующая сил давления направлена противоположно  $\mathbf{v}$ , по модулю равна силе сопротивления (силе жидкого трения) и существенно зависит от скорости движения.
- Ньютон установил для двух слоев жидкости с разными скоростями ( $dv/dh \neq 0$ ) разделенных тонкой площадкой  $\Delta S$  :

$$\Delta F_{\text{тр}} = \eta \Delta S \frac{dv}{dh}$$

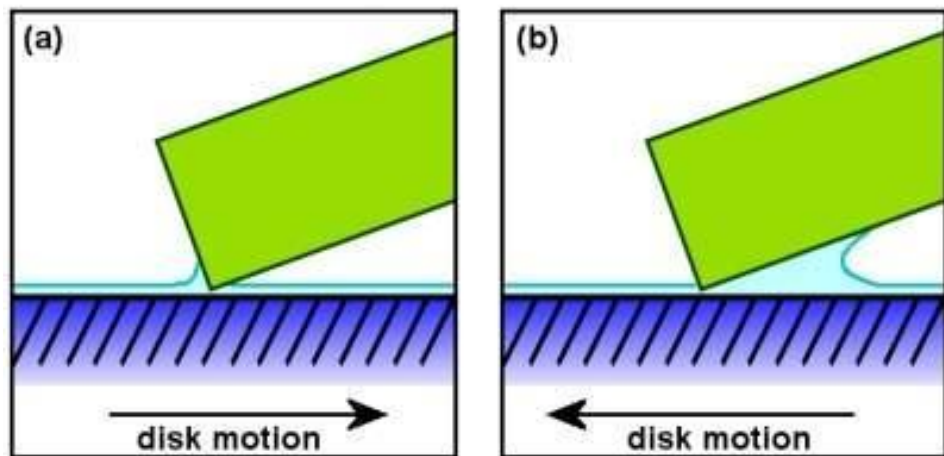
# Движении твердого тела в жидкой среде (верно и для газа).

- При **малых скоростях** коэфф. внутреннего трения  $\eta$ , а также форма, размеры, шероховатость тела и определяют **коэфф жидкого трения  $b$**  :

$$F_{тр.ж.} = -b\mathbf{v} \text{ для шарика } b=6\pi\eta r$$

- При больших  $v$  по модулю  $F_{тр.ж.} = -b_1 v^2$  или векторно  $F_{тр.ж.} = -b_1 v\mathbf{v}$ . При дальнейшем увеличении скорости  $b_1$  может измениться. Какой  $b_1$  у катера мчащегося с  $V=1000$  км/ч ? Должен быть минимален!
- При больших скоростях и размерах позади тела возникает турбулентность, приводящая к дополнительной разнице давлении и сила сопротивления среды может превосходить силу вязкого трения. Т.е. правильно говорить о силе **жидкого трения + силе сопротивления среды**.
- Отметим, что при отклонении  $v$  от оси симметрии тела возникает подъемная сила. Т.е. это верно и для газа (пример, взлетающий самолет ).  
**Жидкого трения покоя не существует. Если скорость  $v=0$  то  $F_{тр.ж.} = 0$  и огромный корабль сдвигаем с места пальцем!**  
**К сожалению как только он тронулся сразу появляется сила трения**  
**Микрокапли отказались подчиняться законам трения!**

## Факультативно: «Жидкое» трение – в реальном компьютере



Когда диск (темно синего цвета) двигается навстречу ползунку (зеленого цвета) записывающей/считывающей головки (а), то

образуется мениск из смазочной жидкости. Но он достаточно маленький и потому не вносит значительного вклада в общую силу трения. Но если диск движется от ползунка (б), то возле него смазка скапливается в большом количестве и, следовательно, оказывает большее влияние.

**Кто то хочет жидкое трение уменьшить, а кто то увеличить (покрышки)! Эффект водяного клина.**



# Теперь поговорим об относительности, больших расстояниях и скоростях.

**Вселенная** – это весь мир, безграничный во времени и пространстве. Доступна изучению астрономическими средствами только часть Вселенной. Эта часть обычно называется **Метагалактикой**.

Только в 30-х годах XX века удалось установить размеры и основные черты строения нашей Галактики, в которую входит Солнце. Поперечник Галактики примерно 30 000 парсек или около 100 000 световых лет.

**1 парсек (пк) = 3,26 светового года =  $3,08 \cdot 10^{16}$  м.**

# Галактики

В галактику входит более 100 млрд. звезд и расположены они в слое диска толщиной в несколько сотен парсек, следовательно толщина диска намного меньше его диаметра. Средний возраст галактик приблизительно 10 млрд. лет.

Все галактики Хаббл разбил на три основных типа: **эллиптические, спиральные и неправильные.**

Общее число звезд в Метагалактике – более  $10^{19}$ . Предельный стабильный размер звезды до  $62 M_{\odot}$ . Плотность от 1.41 (у Солнца) до  $10^{14-15}$  г/см<sup>3</sup> (у нейтронных звезд).

**Т.е. масса распределена очень не равномерно кстати также как и в Земле (средняя плотность 5.5 г/см<sup>3</sup>).**

# Пространственная структура Вселенной

Вселенная расширяется. Скорость разлета галактик прямо пропорциональна расстоянию от нашей Галактики.

Факт разлета галактик подтверждается **“красным смещением”** вследствие известного в физике эффекта Доплера.

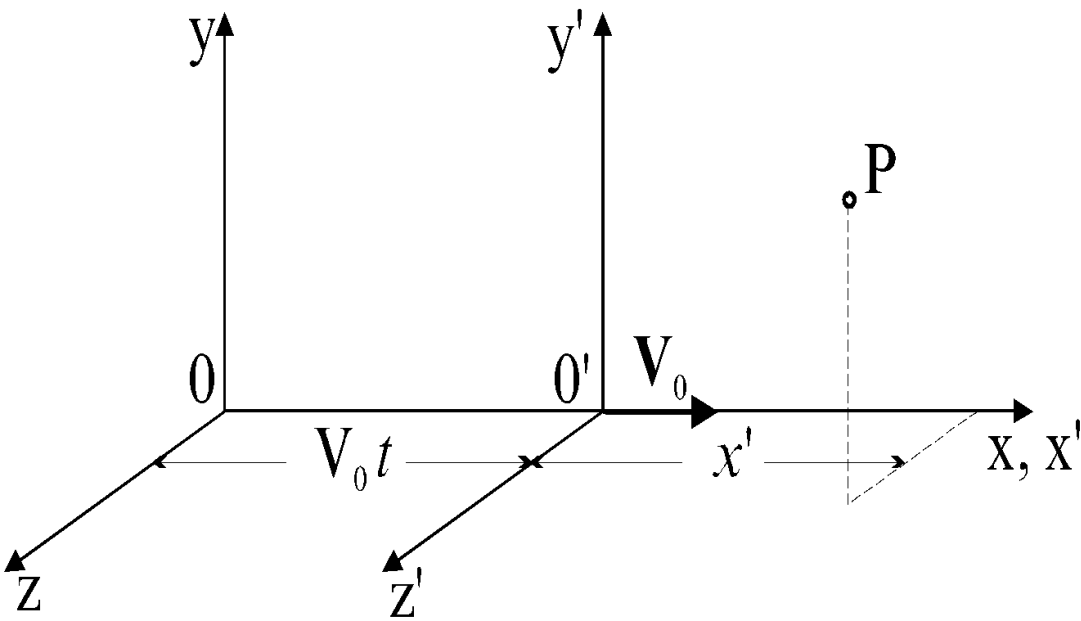
Экстраполяция расширяющейся Вселенной в обратную временную сторону приводит к выводу, что все началось с большого взрыва около 15 млрд. лет назад, что и считают возрастом Вселенной.

# Солнце

- **Солнце**- газовый (68% водорода, 30 % гелия) или плазменный шар возраста 4.6 миллиарда лет на расстоянии 1 а.е. (астрономическая единица  $\approx 1.5 \cdot 10^8$  км). Радиус  $R \approx 7 \cdot 10^8$  м (в 109 раз больше Земли),  $M \approx 2 \cdot 10^{33}$  кг (в **333000?** больше Земли и около 99.866 % массы солнечной системы). Плотность  $\rho = 1.41$  г/см<sup>3</sup> (0.256 от плотности Земли),  $g_c = 271$  м/с<sup>2</sup> (в 27,5 раз больше чем на Земле). Температура на поверхности  $T = 5830$  К а внутри 16 миллионов К. Мощность излучения – светимость  $3.85 \cdot 10^{33}$  эрг/с =  $3.86 \cdot 10^{26}$  Вт.
- Идет ядерная реакция синтеза гелия из водорода. Из-за многократного поглощения и переизлучения от центра Солнца эл.-маг. излучение (рентгеновский диапазон) идет до поверхности очень долго . А от Солнца до Земли за 8 мин.
- При прохождении к поверхности спектр эл.-маг. излучения существенно меняется и наблюдаемое излучение в оптическом диапазоне формируется в тонком поверхностном слое – фотосфере толщиной около 350 км. Оно тепловое и хорошо описывается в видимой и ИК области спектра функцией Планка с эффективной температурой  $T = 5830$  К.
- **Солнечная постоянная** – **полное** количество лучистой энергии Солнца , доходящее до 1 м<sup>2</sup> Земли вне атмосферы  $1369$  Вт/м<sup>2</sup> ( $H \approx 1000$  км над поверхностью Земли) из них основная часть в диапазоне 0.1-4 мкм. Только  $336$  Вт/м<sup>2</sup> доходит до Земли. В климатологии из нулевого уравнения теплового баланса Земли следует, что поглощается Землей тепло  $157$  Вт/м<sup>2</sup>,  $80$  Вт/м<sup>2</sup> поглощается облаками, аэрозолями и газами. А еще есть в диапазоне 3-45 мкм. В этом диапазоне обратно в космос уходит  $235$  Вт/м<sup>2</sup>. Ежедневно на поверхности Земли от Солнца приходит  $10^{18}$  Вт.



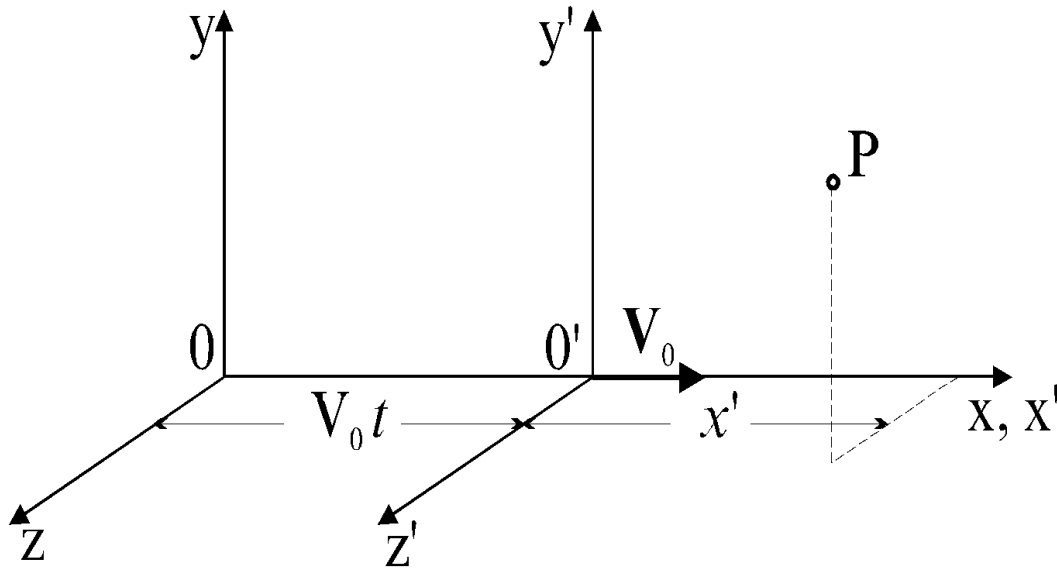
# Принцип относительности Галилея



Рассмотрим две инерциальные системы отсчета, одна из которых покоится, а другая движется по отношению к ней с постоянной скоростью  $V_0$ ,

направленной вдоль оси  $x$ . Чтобы системы как-то различать в подвижной системе будем все символы обозначать с индексом т.е., например,  $v'$

# Преобразованиями Галилея



Связь между координатами  $x, y, z$  некоторой точки  $P$  в первой системе и координатами  $x', y', z'$  той же точки в второй системе можно записать как:

Совокупность уравнений - **преобразования Галилея**. 1-е и 4-е уравнения справедливы только для классической механики, то есть при  $V_0 \ll c$ . При  $V_0$  сравнимых со скоростью света  $c$  преобразования Галилея заменяются на более общие преобразования Лоренца.

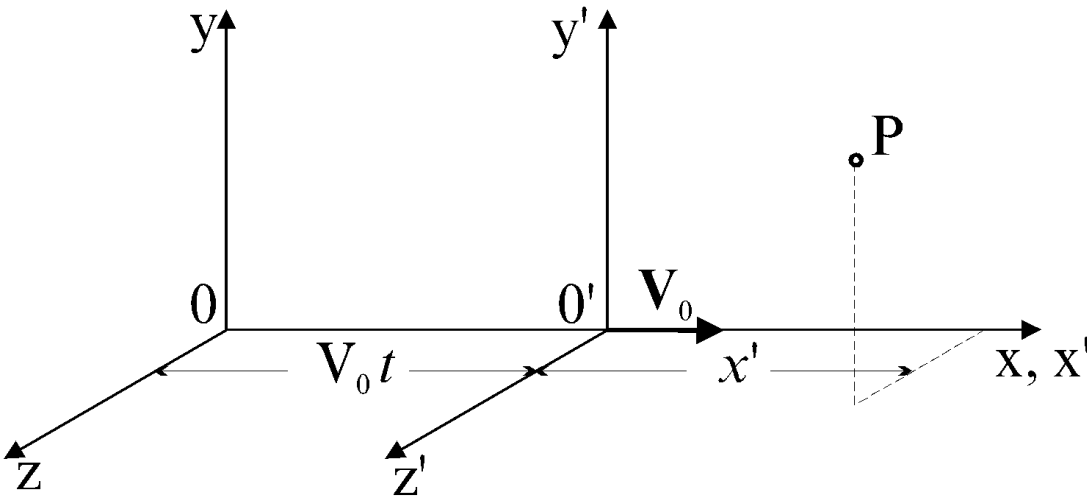
$$x = x' + V_0 t'$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

$$t = t'$$

# Правилом сложения скоростей



Продифференцируем координатные соотношения по времени и найдем связь между скоростями:

$$x = x' + V_0 t$$

или

$$V_x = V'_x + V_0$$

$$y = y'$$

$$V_y = V'_y$$

$$z = z'$$

$$V_z = V'_z$$

Эти три скалярных соотношения эквивалентны одному векторному:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}' + \mathbf{V}_0$$

# Принципом относительности Галилея

Продифференцируем по времени выражение учитывая при этом, что  $V_0 = \text{const}$ :

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}' + \mathbf{V}_0 \quad \mathbf{V} \dot{=} \mathbf{V}' \quad \text{или} \quad \mathbf{a} = \mathbf{a}'$$

**Ускорение тела во всех инерциальных системах отсчета оказывается одинаковым.** Масса в классической механике постоянна, то умножив обе части последнего уравнения на  $m$  получим:

$$m\mathbf{a} = m\mathbf{a}' \quad \text{или} \quad \mathbf{F} = \mathbf{F}'$$



# Принцип относительности Галилея

- **Уравнения механики инвариантны** (латинское invariants-неизменяющийся) по отношению к преобразованиям Галилея. Это **принцип относительности Галилея**
- Все **механические явления в различных инерциальных системах отсчета протекают одинаково**, вследствие чего никакими механическими опытами **невозможно установить, покоится данная система отсчета или движется прямолинейно и равномерно**. Время идет одинаково в обеих системах  $t=t'$
- Галилей «.....В закрытой каюте корабля движущегося прямолинейно и равномерно ....полет мухи, ...длина прыжка, падение капли воды .....все одинаково как и в покоящейся»

# Преобразования Галилея

- Но так как  $V = V' + V_0$  то **скорость, кинетическая энергия и импульс – вариантыные величины.**
- **Сила, потенциальная энергия, масса – инварианты**
- **Уравнения** вид которых не изменяется при переходе к другой системе отсчета тоже **инварианты**. Сами величины входящие в уравнение могут меняться, а формулы их связывающие неизменны.
- **Закон сохранения количества движения и энергии справедливы во всех инерциальных системах отсчета.**
- Т.е. если энергия в какой то инерциальной системе сохраняется, то в любой другой инерциальной системе она тоже сохраняется.
- Все три закона Ньютона справедливы во всех инерциальных системах отсчета.

# СТО

- 1905 г. – опираясь на работы Галилея, Эйнштейн совместно с Лоренцом и Пуанкаре и другими учеными создает СТО
- 1916 г. - Эйнштейн создал также ОТО - классическую (не квантовую) релятивистскую теорию гравитации.
- Он распространяет механический принцип относительности Галилея на все остальные физические явления: **Законы всей природы (а не только механики) одинаково формулируются для всех инерциальных СО.** В основе теории: принцип относительности, принцип постоянства скорости света и изотропность пространства.
- Показал, что преобразования Галилея надо заменить на более общие преобразования Лоренца

# Принцип постоянства скорости света.

- **Скорость света в вакууме**  $c=2.997 \cdot 10^8$  м/с не зависит от движения источников света и, следовательно, одинакова во всех инерциальных системах отсчета (инвариантна) и является предельной скоростью распространения взаимодействий в природе. Не зависит от движения источника. Постулат является следствием опытных фактов (показано ранее в 1887 г. Майкельсоном и Морли).
- Относительная скорость материальных тел не может быть больше скорости света . То есть предельная скорость для материальных тел и любых физических воздействий.
- В отличии от вакуума в среде групповая и фазовые скорости отличаются. Экспериментально всегда определяется групповая = скорости передачи сигнала или передачи энергии. **Пары натрия и низкая температура !**



# Факультативно

С чем сравнить скорость света?

Это мало или много?

$$r = \frac{\hbar^2}{me^2} \quad - \text{ра}$$
$$\Delta p \Delta r \geq \frac{\hbar}{2} \quad \text{Соотношение неопределенности}$$

$$V \geq \frac{\hbar \Delta p}{m} \approx \frac{\hbar}{mr} \approx \frac{e^2}{\hbar} \Rightarrow \frac{V}{c} \approx \frac{e^2}{\hbar c} \approx \alpha \approx \frac{1}{137}$$

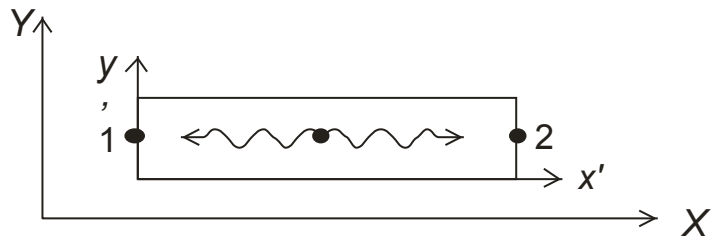
д и с а т

Получаем по порядку величины скорость атомного электрона в основном состоянии в 137 раз меньше скорости света

М а Н

# Время в разных системах отсчета

Понятие **одновременности**, считавшееся в ньютоновской механике **абсолютным**, в действительности **относительно**. Пусть из середины равномерно движущегося поезда испускается в обоих направлениях световой сигнал. **Пассажир** поезда увидит, что сигнал достиг головы и



хвоста поезда **одновременно**. А **дежурный** на станции, что сигнал достиг хвоста поезда **раньше**, чем головы,

так как точка 1 движется навстречу сигналу, а точку 2 свету надо догонять. Пространство и время оказываются взаимосвязанными, образуя единое четырехмерное **пространство-время**. **Принципиально то, что они из разных систем отсчета наблюдают!** Одно и то же событие в инерциальных системах отсчета может иметь разные пространственные координаты и разнесены во времени. То как это происходит для двух инерциальных систем отсчета показал Хендрик Антон Лоренц (1853-1928). В его преобразованиях координаты и время перемешаны.

# Принцип относительности Эйнштейна.

При переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую надо пользоваться **преобразованиями Лоренца**:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \frac{t' + \left(\frac{v}{c^2}\right)x'}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{array} \right. , \text{ где } \beta = \frac{v}{c}$$

**Уравнения, выражающие законы природы, инвариантны по отношению к преобразованиям Лоренца.**

При  $V \ll c$  превращаются в преобразования Галилей

# Физики снова подтвердили теорию относительности

Принцип лоренц-инвариантности постулирует, что **все физические законы действуют одинаково вне зависимости от положения и ориентации лаборатории в пространстве и от момента времени** , в частности, неизменность физических процессов при повороте системы на произвольный угол. Так, поворот лаборатории вместе с поверхностью Земли в ходе суточного вращения планеты не должен влиять на процессы. И днем и ночью результат должен быть одинаков.

- Для проверки физики использовали нейтрино - частицы с очень высокой проникающей способностью. Нейтрино, получаемые при облучении углеродной мишени на ускорителе заряженных частиц, направлялись через слой грунта на расположенный в нескольких сотнях метров детектор, который регистрировал количество и энергию частиц. Зависимости результата от времени суток не обнаружилось. **Пучок ведет себя одинаково при любом положении в пространстве и все направления оказываются для него одинаковы: принцип инвариантности работает.** Равноправие направлений в пространстве очевидно. Но существует ряд теорий, в которых выделенное направление существует и играет важную роль в формировании Вселенной.

# Относительность времени

Время между событиями  $\tau_0$  в неподвижной системе отчета, а буквой  $\tau$  — время между теми же событиями в системе отсчета, движущейся со скоростью  $V$  относительно первой системы. Тогда

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{v}{c}$$

Так как  $\tau > \tau_0$  то в движущихся системах время течет медленнее. Проявляются заметным образом лишь при скоростях движения, близких к скорости света  $c$ .



# Замедление времени

- **Парадокс близнецов.** Один на земле а второй летит в космос с большой скоростью. Кто их близнецов старше? В действительности для парадокса близнецов принципиально важно чтобы один близнец находился в инерциальной системе отсчета (на Земле, например), а второй в неинерциальной системе отсчета которая движется с ускорением (в ракете в космосе). С другой стороны каждый из близнецов находится в совершенно одинаковой ситуации относительно другого и должен быть старше другого. За 100 лет было сделано немало попыток его разрешения.
- Среднее время жизни нестабильной частицы мезона  $\sim 10^{-6}$  сек и он не мог бы долететь до Земли с высоты 10-20 км если бы для него не замедлялось время вследствие движения со скоростью близкой к  $c$
- Но если между событиями имеется причинная связь, то **событие-причина** во всех системах отсчета **предшествует событию-следствию. **Сын не рождается раньше отца** .** Надо пробовать с идеальными часами на работу которых не влияет ускорение!  
**Атомные часы?**

# Замедление времени реальность!

в 2010 году физики экспериментально подтвердили замедление времени. Использование сверхточных атомных часов **показало замедления времени вблизи массивных объектов**. Студенту, который находится дальше от объекта, будет казаться, что часы его сокурсника, который стоит ближе к объекту, идут медленнее.

Показано, что с точки зрения неподвижного студента «стрелки» на атомных часах движущегося коллеги будут перемещаться медленнее ( замедления хода часов при движении).

# Факультативно

- В 2007 году Профессор Суббаш Как из университета штата Луизиана предложил вернуться к формулировке принципов относительности Анри Пуанкаре, разработанной в 1904 году. В ней, в отличие от принципов относительности Эйнштейна, не было введено каких-либо предположений о физической природе Вселенной.
- Постулат: **характер физических процессов обуславливается крупномасштабной структурой Вселенной**. При этом появляется возможность определить метод выделения инерциальных систем отсчета из множества всех систем отсчета, не вводя при этом понятия "абсолютного пространства". Тем самым инерциальные системы удастся "привязать" к крупномасштабной структуре Вселенной.

# Факультативно

## ОТО

### *Сверхпроводимость на службе у общей теории относительности*

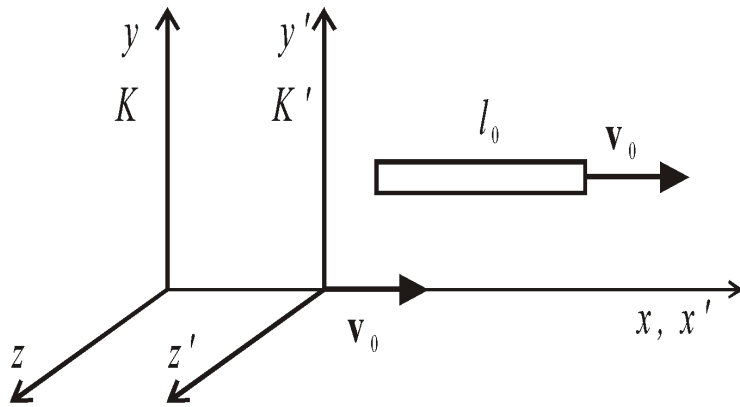
Число экспериментов, для объяснения которых необходимо привлекать общую теорию относительности (ОТО) Эйнштейна, можно пересчитать по пальцам. В качестве примера обычно приводят результаты измерения прецессии орбиты Меркурия. А можно ли провести исследования в лабораторных условиях, не прибегая к услугам астрономов? В принципе – да, только эта лаборатория должна находиться в космосе. Теория предсказывает, что тело, вращающееся по околоземной орбите, должно прецессировать с угловой скоростью  $6.6''/\text{год}$  в плоскости орбиты и  $0.042''/\text{год}$  перпендикулярно этой плоскости. Однако регистрация такого мизерного эффекта долгое время считалась невозможной. Американские ученые предложили провести эксперимент в жидком гелии, используя в качестве ротора сверхпроводник. Направление его оси вращения может быть определено с очень высокой точностью по направлению сопутствующего вращению сверхпроводника магнитного момента (лондоновского мо-

мента). Для этого было предложено использовать опять же сверхпроводящее устройство – СКВИД. Расчеты показали, что точности должно хватить для регистрации прецессии оси вращения. Проект получил название “Gravitation Probe B” (GPB). Спутник со всем необходимым оборудованием (см. рис.) был выведен на орбиту в 2008 г. Сейчас ученые занимаются обработкой полученных данных. Собственно говоря, в справедливости ОТО мало кто сомневается. Но обращает на себя внимание сам факт использования одного фундаментального явления (сверхпроводимости) для исследования другого – еще более фундаментального (гравитации). Да и кто знает, к чему приведет расшифровка результатов. Все-таки сверхпроводник – это вам не Меркурий...



Спутник, запущенный в рамках проекта GPB. Все экспериментальное оборудование заключено в большой контейнер с жидким гелием.

# Относительность расстояния



Стержень длины  $l'_0 = x'_2 - x'_1$  неподвижный относительно “штриховой” системы отсчета  $K'$ , движется вдоль оси  $X$  со скоростью  $v_0$

Длина стержня  $l$  в неподвижной системе отсчета  $K$

равна:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \beta^2}$$

$$\beta \rightarrow 1$$

$$l \rightarrow 0$$



# Сложения скоростей

Пусть частица движется вдоль осей  $x$  и  $x'$  в направлении скорости  $V_0$  движущейся системы отсчета. Пусть  $V$  — скорость в системе  $K$ ,  $V'$  — скорость в системе  $K'$ . Тогда

$$V = \frac{V' + V_0}{1 + \frac{V_0 V'}{c^2}}$$

Такая связь скоростей не так как у Галилея. Можно утверждать, что **пространство и время неотделимы** и представляют единую 4-х мерную СК (в общем случае  $N$ -мерную).

Искривление такого пространства есть уже при  $N=4$

# Зависимость массы от скорости

- Инертная масса зависит от скорости как

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

- При увеличении  $V$  инерция тела растет и при  $V \rightarrow c$   $m \rightarrow \infty$ .
- Ни одно тело при  $m > 0$  не может достигнуть  $c$ .
- При  $V \rightarrow c$   $m \rightarrow \infty$ , а  $l \rightarrow 0$ . **Материальная точка?**
- Вот бы ее в пары натрия при наноК где скорость света десятки метров в секунду!

# Второй закон Ньютона

Выражение для импульса частицы в теории относительности имеет вид:

$$\mathbf{P} = \frac{m\mathbf{V}}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Основное уравнение релятивистской динамики материальной точки :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m\mathbf{V}}{\sqrt{1-\beta^2}} \right) = \mathbf{F}$$

# Энергии свободной частицы

Полная энергия свободной частицы, движущейся со скоростью  $v$ :

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Свободной называют частицу, на которую не действуют никакие силы. Неподвижная частица обладает энергией

$$E_0 = mc^2$$

Энергия  $E_0$  называется **энергией покоя** и представляет собой внутреннюю энергию частицы. Т.е. тело с инертной массой покоя  $m$  обладает определенным запасом энергии пропорциональным  $m$ . **1 моль вещества содержит**

**энергию около  $9 \cdot 10^{13}$  Дж**

# Факультативно: Природа массы?

сделали заключение, что *вся* масса электронов имеет чисто электромагнитную природу. Более того, можно было даже предполагать, что масса *любых* тел есть электромагнитная масса, так как внутри всех тел, даже незаряженных, имеются интенсивные электромагнитные поля, обусловленные электронами и положительными ядрами атомов.

Впоследствии, однако, выяснилось, что подобные представления сопряжены с серьезными трудностями. Многочисленные попытки построения теории элементарных частиц в предположении, что масса их имеет чисто электромагнитную природу, привели к внутренним противоречиям, не устраненным до настоящего времени. С другой стороны, хорошо известно, что существуют элементарные частицы, например нейтроны (см. Атомную физику), обладающие массой, но не имеющие вовсе электрических зарядов. Поэтому приходится допустить, что электромагнитная масса может представлять лишь часть массы элементарных частиц («полевая» масса), в то время как другая ее часть не связана с электромагнитным полем («неполевая» масса).

С.Г. Калашников, Общий курс физики, Электричество,  
Наука, 1970, стр. 621

# Факультативно

Настоящее оказалось переходным звеном между квантовым будущим и классическим прошлым

- Физики предложили новую модель Вселенной, в рамках которой квантовое будущее приводит к своего рода "кристаллизации" классического прошлого через настоящее.
- По аналогии с ОТО ученые рассматривали **Вселенную в качестве четырехмерного куска пространства-времени с фиксированными границами**. При этом выделенного момента времени никакого не вводится.
- **Пока этот кусок относится к будущему, его природа исключительно квантовая**. В будущем с разной степенью вероятности могут присутствовать одновременно несколько возможных событий.
- **Прошлое подчиняется классическим законам физики**, то есть все физические величины однозначно определены.
- Течение времени - эволюцию законов пространства-времени. **Настоящее в этом случае - это момент перехода от квантовых законов к классическим**