

# Основные принципы в физике

В.Ф.Ежов

- С давних времен исследователи стремились построить картину мира исходя из первых принципов.
- Прогресс в области фундаментальной физики часто сопровождается введением нового принципа, являющегося ключевым ориентиром, направляющим теорию к успеху.
- Все развитие физики непосредственно связано с трансформацией понятий об основных принципах в физике, т.е. фактически в поиске этих принципов.

# Анаксимандр

- Земля пребывает неподвижной по причине одинакового расстояния от всех вещей.

# Принципы

- Обычно принцип состоит в том, что для истинного движения некоторая физическая величина, зависящая от характеристик системы, имеет наименьшее значение по сравнению с другими возможными движениями.
- В этом случае математическим методом определения являются методы вариационного исчисления.

# Формы вариационных принципов

- Дифференциальные, устанавливают, чем истинное движение системы отличается от кинематически возможных в каждый данный момент времени
- Интегральные, устанавливают это различие для перемещений, совершаемых системой за конечный промежуток времени.
- В рамках механики дифференц. принципы имеют более общий характер, т. к. они приложимы к системам с любыми голономными (геометрическими) и неголономными связями.

# Принцип Гаусса

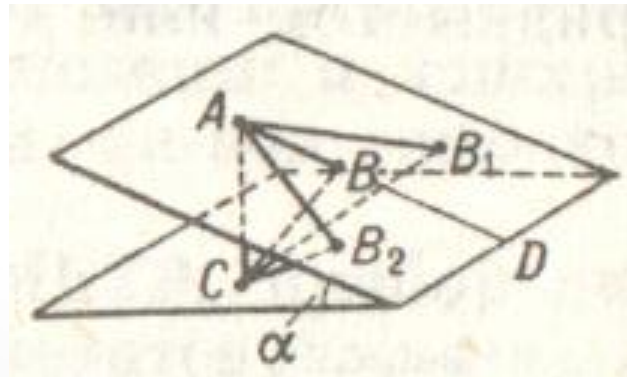
- Минимальным является принуждение. Иными словами из всех кинематически возможных движений, начинающихся из данного положения, истинным будет то для которого принуждение  $Z$  в каждый момент времени является минимальным.

Свободная материальная точка под действием силы  $F$  будет двигаться с ускорением  $F/m$ , если же на систему наложены связи, то вместо ускорения  $F/m$ , она будет двигаться с ускорением  $w$

- $$Z = \frac{1}{2} m \left( \frac{\vec{F}}{m} - \vec{w} \right)^2 \quad \text{и} \quad \delta Z = 0$$

# Принцип Гаусса

- Пример точка на наклонной плоскости. В отсутствии наклонной плоскости тело падало бы с ускорением  $g$ . Т.е. тело упало бы в точку  $C$ . При наличии же наклонной плоскости реализуется траектория, для которой расстояние от точки  $C$  до точки траектории на плоскости минимально – по перпендикуляру от вертикали к наклонной плоскости. Таким образом, отклонение движения точки от свободного движения будет зависеть от разности этих ускорений.



# Принцип Герца

- Принцип Герца – принцип наименьшей кривизны траектории. Этот принцип устанавливает, что при отсутствии активных, т.е. заданных сил, действительной будет траектория, имеющая наименьшую кривизну. При этом его математическое выражение совпадает принципом Гаусса.
- Этот принцип был использован Г. Герцем для построения механики, в которой действие активных сил заменяется введением соответствующих связей.



# Принцип возможных перемещений

- Устанавливает условие равновесия механической системы.
- Для равновесия механической системы необходимо и достаточно, чтобы сумма работ  $\delta A_i$  всех приложенных к системе активных сил на любом возможном перемещении системы была равна нулю.  $\Sigma \delta A_i = \Sigma F_i \delta s_i = 0$

# Принцип Д'Аламбера-Лагранжа.

- Если к действующим на точки механической системы активным силам  $F_i$  присоединить силы инерции  $J_i = -m_i w_i$  то согласно этому принципу при движении механической системы в каждый момент времени сумма элементарных работ активных сил и сил инерции равна нулю.

$$\sum (\delta A_i^F + \delta A_i^J) = 0$$

- Этот принцип широко используется при решении задач в динамике и статике.

# Принцип наименьшего действия (интегральный)

- Это название появилось еще в 1744 году,
- ОСНОВНАЯ ИДЕЯ -- достижение какой то цели, как, (например, при игре в карты), а не исходя из физического смысла.
- Мопертюи дал ему это название на основе метафизических представлений о Природе, где все должно происходить из каких то разумных соображений как будто бы Природа в своих действиях преследует какие -то цели, которые сама перед собою и ставит.

# Принцип наименьшего действия

(в форме Гамильтона - Остроградского)

- В принципе Гамильтона - Остроградского сравниваются движения, происходящие между двумя данными конфигурациями системы за один и тот же промежуток времени,
- под **действием** в простейшем случае понимается определ. Интеграл по времени от разности между кинетич. и потенциальной энергиями системы.

# Принцип наименьшего действия

## (в форме Гамильтона - Остроградского)

- Если ввести функцию Лагранжа (разность кинетической и потенциальной энергий):  $L = T - V = \frac{mv^2}{2} - V(x)$
- то величина  $S = \int_{t_0}^t L dt$  называется действием по Гамильтону за промежуток времени  $t - t_0$
- Для всех возможных перемещений из одной конфигурации в другую, совершаемых за один и тот же промежуток времени, реализуется то, для которого действие минимально, т.е.  $\delta S = 0$ , при этом время не варьируется.

# Принцип наименьшего действия (в форме Мопертюи - Лагранжа)

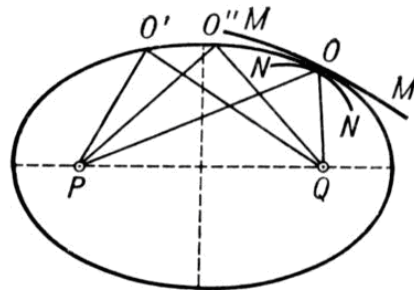
- В принципе Мопертюи - Лагранжа сравниваются движения консервативной системы между двумя данными её конфигурациями, происходящие с одной и той же нач. кинетич. энергией, а под действием понимается определ. интеграл по времени от удвоенной кинетич. энергии системы

# Принцип наименьшего действия (в форме Мопертюи - Лагранжа)

- Действием по Лагранжу за промежуток времени  $t - t_0$
- называется величина  $W = \int_{t_0}^t 2T dt$
- Для системы, в которой выполняется закон сохранения механической энергии  $S = W - h(t - t_0)$
- где  $h = T + V$  - полная энергия системы.
- Для всех возможных перемещений из одной конфигурации в другую, совершаемых при сохранении полной энергии системы, реализуется то, для которого действие по Лагранжу минимально, т.е.  $\Delta W = 0$   $\Delta$  - символ полной вариации.
- Основное отличие от принципа Гамильтона заключается в том, что **варьируется не только траектория и скорости, но и время** перемещения из одной конфигурации в другую.

# Принцип Ферма

- Основной принцип геометрической оптики.
- Реальный луч света распространяется от одной точки к другой по линии, вдоль которой время его прохождения экстремально или одинаково по сравнению с временами прохождения вдоль других линий. Здесь необходимо подчеркнуть, что путь не обязательно минимальный, а может быть и максимальным или одинаковым. Это утверждение легко продемонстрировать на примере зеркала в форме эллипсоида вращения. При распространении света от одного фокуса до другого в нем все траектории будут одинаковы. Если же кривизна зеркала будет меньше, чем кривизна эллипсоида вращения, реализуется минимальный путь, а в противоположном случае - максимальный.



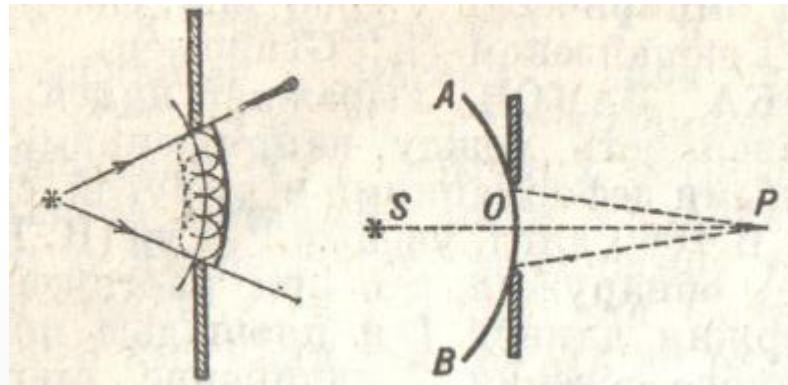
$$\delta \int_A^B n dl = 0$$

- для однородной среды оптическая длина пути  $S = nl$



# Принцип Гюйгенса-Френеля.

- Первоначальный принцип Гюйгенса утверждал, что каждый элемент поверхности, которой достигла волна в данный момент времени, является центром элементарных волн, огибающая которых будет волновой поверхностью в следующий момент времени.
- Френель дополнил этот принцип введением понятия о когерентности элементарных волн и их интерференции.





- Интересно, что доказательству Гюйгенса закона преломления на основании его гипотезы о волновой природе света предшествовало рассуждение патера Меньяна "О солдатском фронте".
- Они сводятся к тому, что при переходе из одной среды в другую световой фронт меняет свое направление так же, как меняет направление шеренга солдат, когда луг, по которому идут солдаты, преграждается пашней и граница между пашней и лугом проходит под углом к шеренге. Скорость движения солдат по пашне меньше, чем по лугу. Для сохранения строя солдаты должны маршировать по параллельным линиям как при движении по лугу, так и по пашне. Рисунок, иллюстрирующий такое движение солдатского фронта, аналогичен тому, который использовал Гюйгенс для объяснения изменения волнового фронта при преломлении и который теперь воспроизводится во всех учебниках. Очевидно, что фронт солдат быстрее всего пересечет любое замеченное место на пашне, если направление шеренги будет подчиняться закону преломления (1). Таким образом, в этих рассуждениях фактически содержалось доказательство закона преломления на основании принципа Ферма.

# Принцип относительности

- Любой физический процесс протекает одинаково в изолированной материальной системе, находящейся в состоянии покоя, и в такой же системе, находящейся в состоянии равномерного прямолинейного движения.
- Эквивалентная формулировка гласит, что законы физики имеют одинаковую форму во всех инерциальных системах отсчета.
- Математическая формулировка – сохранение интервала.
- Принцип относительности приводит к постоянству скорости света (на самом деле – постоянству скорости распространения взаимодействий).

# Принцип причинности

- Принцип причинности исключает влияние данного события на все прошедшие события, (будущее не влияет на прошлое). Он также требует отсутствия влияния таких событий, применительно к которым понятия «раньше» и «позже» не имеет смысла.
- В теории относительности такая ситуация возникает, например, тогда, когда расстояние между событиями столь велико, а временной интервал столь мал, что эти события могли бы быть связаны лишь сигналом, распространяющимся быстрее скорости света.
- Принцип причинности реально используется, прежде всего, для выбора соответствующих граничных условий при решении уравнений динамики. Так, например, при решении уравнений Максвелла делается выбор между опережающими и запаздывающими потенциалами.

# Принцип причинности и принцип относительности

- 
- 1. Силы, действующие на частицу в данный момент, не определяются расположением других частиц в этот момент. Изменение положения одной частицы сказывается на других лишь спустя некоторый промежуток времени.
- 2. Законы сохранения должны быть локальными. Пример с сохранением заряда.
  - Мыслимы два возможных сценария сохранения заряда. Первый – заряд перемещается непрерывно от точки к точке, и второй – заряд в одном месте исчезает и в то же самое мгновение появляется в другом. Рассмотрим два космических корабля, движущихся один относительно другого. В одном из кораблей заряд исчезает в одном конце корабля и тут же возникает в другом. Для наблюдателя, находящегося посередине этого корабля, события одновременны, а для наблюдателя в другом корабле из-за конечности скорости света видит, что сначала появился заряд в одном конце, а через некоторое время исчез в другом, либо наоборот в зависимости от направления движения корабля.
- 3. Не бывает абсолютно твердых тел.
  - В невозможности существования в теории относительности абсолютно твердых тел легко убедиться. Пусть какое-нибудь твердое тело приводится в движение внешним воздействием на него в какой-нибудь одной точке. Если тело является абсолютно твердым, то все его точки должны прийти в движение одновременно, в противном случае возникнет деформация тела. Теория же относительности делает это невозможным, поскольку воздействие от одной точки к другой должно передаваться с конечной скоростью.
-

# Принцип эквивалентности

- Поле тяготения в небольшой области пространства и времени, в которой его можно считать однородным и постоянным во времени, эквивалентно ускоренной системе отсчета.

# Принцип детального равновесия

- Общий принцип квантовой механики и статистической физики, согласно которому для изолированной системы вероятность  $w_{mn}$  прямого перехода между состояниями  $m \rightarrow n$  равна вероятности обратного перехода  $w_{nm}$   $n \rightarrow m$ .
- Принцип детального равновесия является следствием инвариантности относительно обращения времени. Он приводит к тому, что для системы, взаимодействующей с большим резервуаром (термостатом) справедливо:

$$\frac{w_{nm}}{w_{mn}} = \exp\left(\frac{E_m - E_n}{kT}\right)$$

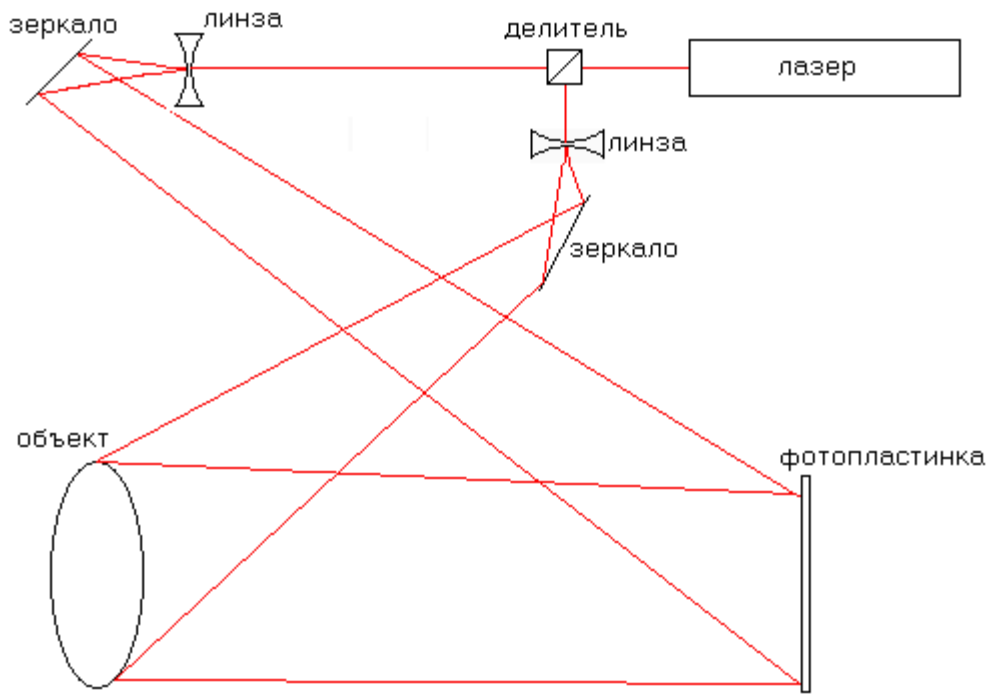
# ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ

- Принцип суперпозиции (наложения) - это допущение, согласно которому результирующий эффект представляет собой сумму эффектов, вызываемых каждым воздействующим явлением в отдельности. Одним из простых примеров является правило параллелограмма, в соответствии с которым складываются две силы, воздействующие на тело. Принцип суперпозиции выполняется лишь в условиях, когда воздействующие явления не влияют друг на друга.
- В микромире принцип суперпозиции - фундаментальный принцип, который наряду с принципом неопределенности составляет основу математического аппарата квантовой механики. В квантовой теории в суперпозиции складываются альтернативные, с классической точки зрения, исключают друг друга состояния.



# Принципы термодинамики

- Первый закон термодинамики гласит: тепло, сообщенное системе, расходуется на увеличение ее внутренней энергии и на совершение работы против внешних сил. Первый закон термодинамики более известен в другой редакции, абсолютно эквивалентной первой: нельзя построить периодически действующую машину, которая бы совершала работу, больше подводимой к ней извне энергии (или - вечный двигатель первого рода невозможен).
- Существование вечного двигателя второго рода запрещает второе начало термодинамики. Вечный двигатель второго рода - это циклически действующая машина, способная совершать работу за счет переноса тепла от холодного тела к горячему. Это не запрещено первым началом термодинамики, но практически невозможно.
- Второе начало термодинамики указывает на существование двух различных форм энергии - теплоты (связанной с неупорядоченным, хаотическим движением) и работы, связанной с упорядоченным движением. Работу всегда можно превратить в эквивалентное ей тепло. Неупорядоченную форму энергии невозможно полностью перевести в упорядоченную.
- Мерой неупорядоченности, или мерой хаоса, в термодинамике является энтропия. Энтропия не бывает отрицательной, она всегда положительна, за исключением случая, когда идеальный кристалл находится при абсолютном нуле (но на этот счет есть третье начало термодинамики, говорящее о недостижимости абсолютного нуля, равного  $-273^{\circ}\text{C}$ ), что невозможно.



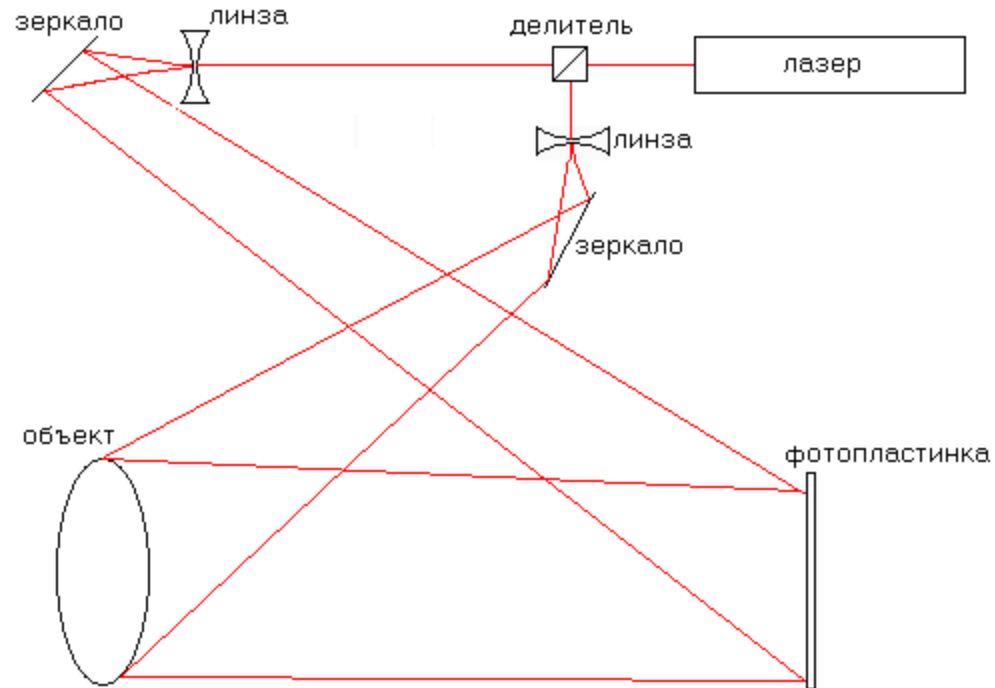
# Голография

При записи голограммы, в определённой области пространства складывают две волны: одна из них идёт непосредственно от источника (опорная волна), а другая отражается от объекта записи (объектная волна). В этой же области размещают фотопластинку (или иной регистрирующий материал), в результате на этой пластинке возникает сложная интерференционная картина. Если теперь эту пластинку осветить волной, близкой к опорной, то она преобразует эту волну в волну, близкую к объектной. Таким образом, мы будем видеть (с той или иной степенью точности) такой же свет, какой отражался бы от объекта записи.

# Принципы в современной физике

- Принцип может также возникнуть из некоторых недавно возникших моделей, некоторого физического факта, который стоит особняком и не может быть оспорен или объяснён существующей физической теорией. С помощью принципа этот факт может быть положен в основу новой теории.
- В ньютоновской теории гравитации, к примеру, пропорциональность инертной и гравитационной масс для всех тел кажется любопытным совпадением и никак не может быть объяснено в рамках этой теории. **Принцип эквивалентности** требует, чтобы этот факт был положен в основу новой теории. Это привело Эйнштейна к общей теории относительности, в которой равенство гравитационной и инертной масс задаётся с самого начала. Тела движутся по геодезическим в искривлённом пространстве-времени и, следовательно, просто не может быть иначе.

# Голография



# Голография

- Голограммы обладают следующими особенностями, отличающими их от фотографий.
- Голограмма дает объемное 3D изображение.
- Голограмму можно разбить, и каждый осколок даст изображение. Объясняется это тем, что каждая точка пластинки при экспонировании подвергается действию волн, отраженных от всех точек предмета. При отделении части голограммы, уменьшается число «штрихов» своеобразной дифракционной решетки. Поэтому уменьшается разрешающая способность и интенсивность изображения при восстановлении, но картинка сохраняется.

# Голография и мозг

- Карл Прибрам (Karl Pribram), работающий в области исследования мозга, пришел к теории голографичности мира, размышляя над загадкой, где и как в мозге хранятся воспоминания. Многочисленные эксперименты показали, что информация хранится не в каком-то определенном участке мозга, а рассредоточена по всему объему мозга.
- К. Прибрам показал, что независимо от того, какой участок мозга крысы он удалял, он не мог добиться исчезновения условных рефлексов, выработанных у крысы до операции.
- Вывод память содержится не в нейронах и не в группах нейронов, а в сериях нервных импульсов, циркулирующих во всем мозге, точно так же, как кусочек голограммы содержит все изображение целиком.

# Голографический принцип

- Голографический принцип “выкристаллизовался” при работе над “Теорией струн” и в теоретических выкладках при изучении свойств так называемых “мембран”. “Мембраны” являются как бы пузырями в пространстве в которых пространство и время деформируются.
- Идея: то что происходит внутри пузыря эквивалентно тому, что происходит на его поверхности. В теории физики чётко продемонстрировали действие голографического принципа, получив удивительный результат – в этих случаях гравитация является силой, действующей в мире 3D, но она исчезает в эквивалентном мире на плоской поверхности.

# Энтропийная сила вместо гравитации

- Энергия системы может быть изменена как путем производства механической работы, так и путем передачи ей определенного количества тепла.  $dE = TdS - PdV$ . То есть, изменение внутренней энергии равно притоку тепловой энергии  $TdS$  минус работа, совершенная телом  $PdV$ .
- Предположим теперь, что тело большое, так что при изменении его объема площадь поверхности  $A$  практически не меняется, а изменение объема связано с перемещением границы стенки  $dX$ , а внутренняя энергия системы при процессе остается неизменной. Тогда приведенное равенство может быть переписано в виде:  $0 = TdS - (PA)dX$ .
- Но давление умноженное на площадь – есть сила  $F$ . Поэтому можно написать:  $TdS = FdX$ . Это значит, что если энтропия меняется в связи с каким-то перемещением, то возникает сила, которая направлена ПРОТИВ УВЕЛИЧЕНИЯ РАССТОЯНИЯ. Это и есть притяжение - гравитация?



- Все крайне просто и жутко привлекательно, так как исчезает главная проблема – представление о гравитационном поле, как о реальном! – А если оно энтропийное, то и проблемы нет. Оно становится «материальным мифом», заменяемым статистикой, причем не слишком чувствительной к устройству реальных физических полей!

- Голографический принцип сопоставляет одни физические законы, которые действуют в некотором объеме, с другими, справедливыми на поверхности, его ограничивающей. Физика на границе представлена квантовыми частицами, которые имеют «цветные» заряды и взаимодействуют почти как кварки и глюоны стандартной физики частиц. Законы внутри — разновидность теории струн, включающая силу тяготения, которую трудно описать в терминах квантовой механики. Однако физика на поверхности и физика в объеме полностью эквивалентны, несмотря на совершенно различные способы описания.

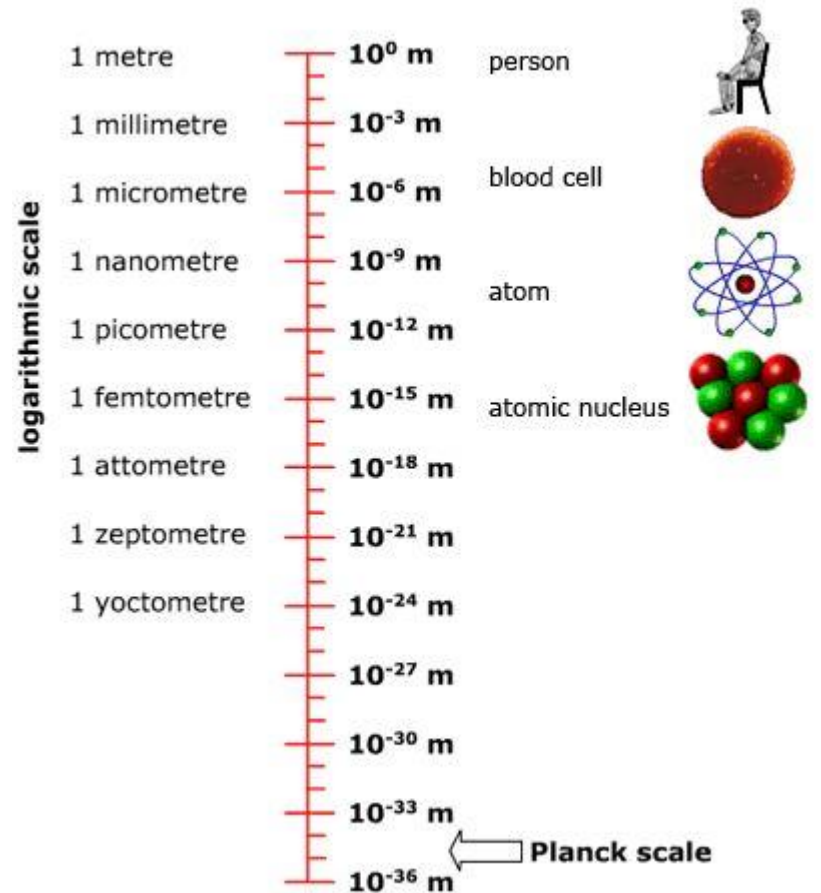
# Голографический принцип - формулировка

- В 1993г знаменитый Голландский физик-теоретик G.'t Hooft выдвинул смелое предположение, которое напоминает Платоновскую Аллегория пещеры. Это предположение, известное под именем Голографический принцип, состоит из двух основных утверждений:
- Первое утверждение Голографического принципа состоит в том, что вся информация, содержащаяся в некоей области пространства, может быть представлена как 'Голограмма' - теория, которая 'живет' на границе этой области. Например, если рассматриваемой областью пространства является кафе-кондитерская, то голографический принцип утверждает, что вся физика, присутствующая в кафе-кондитерской может быть представлена теорией, которая определена на стенках кафе-кондитерской.
- Второе утверждение Голографического принципа состоит в том что теория на границах исследуемой области пространства должна содержать, самое большее, одну степень свободы на Планковскую площадь.

$$l_{pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} = 1,6160(12) \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} = 5,3906(40) \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

$$m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2,1767(16) \cdot 10^{-8} \text{ kg}$$



# Голографический принцип и черные дыры

- Небесные тела, называемые чёрными дырами (массивные звёзды, всё вещество которых, в конце их жизни, обрушилось в одну центральную точку, называемую “сингулярность”). Сингулярность окружена воображаемой сферой, называемой “горизонтом событий”: всё, что попадает внутрь этой сферы, даже свет, никогда не сможет выйти из неё из-за чудовищной силы гравитации.

# Голографический принцип и черная дыра

- Голографический принцип утверждает, что когда объект падает на черную дыру, материя, возможно, и теряется, но информация об объекте каким-то образом отпечатывается на поверхности черной дыры. Имея подходящий инструмент, теоретически вы можете восстановить ее из черной дыры. Горизонт событий черной дыры — точка невозврата, — как и надгробная плита, выполняет двойную функцию. Информация не теряется.



Космический корабль, падающий в сингулярность, трансформируется в объект 2D. Теоретически может быть воспроизведён в обратном порядке в объект 3D.

- Предполагается что информация, содержащаяся в чёрных дырах (в форме частиц), может быть полностью прочитана на поверхности сферы “горизонта событий”. Эта поверхность разделена на ячейки минимально возможного во вселенной размера, это “длина Планка”, и они являются как бы пикселями, на которые как в компьютере может быть записана информация. Идея такая, что на поверхности чёрной дыры остаётся информация обо всём, что на неё упало.



# История двух энтропий

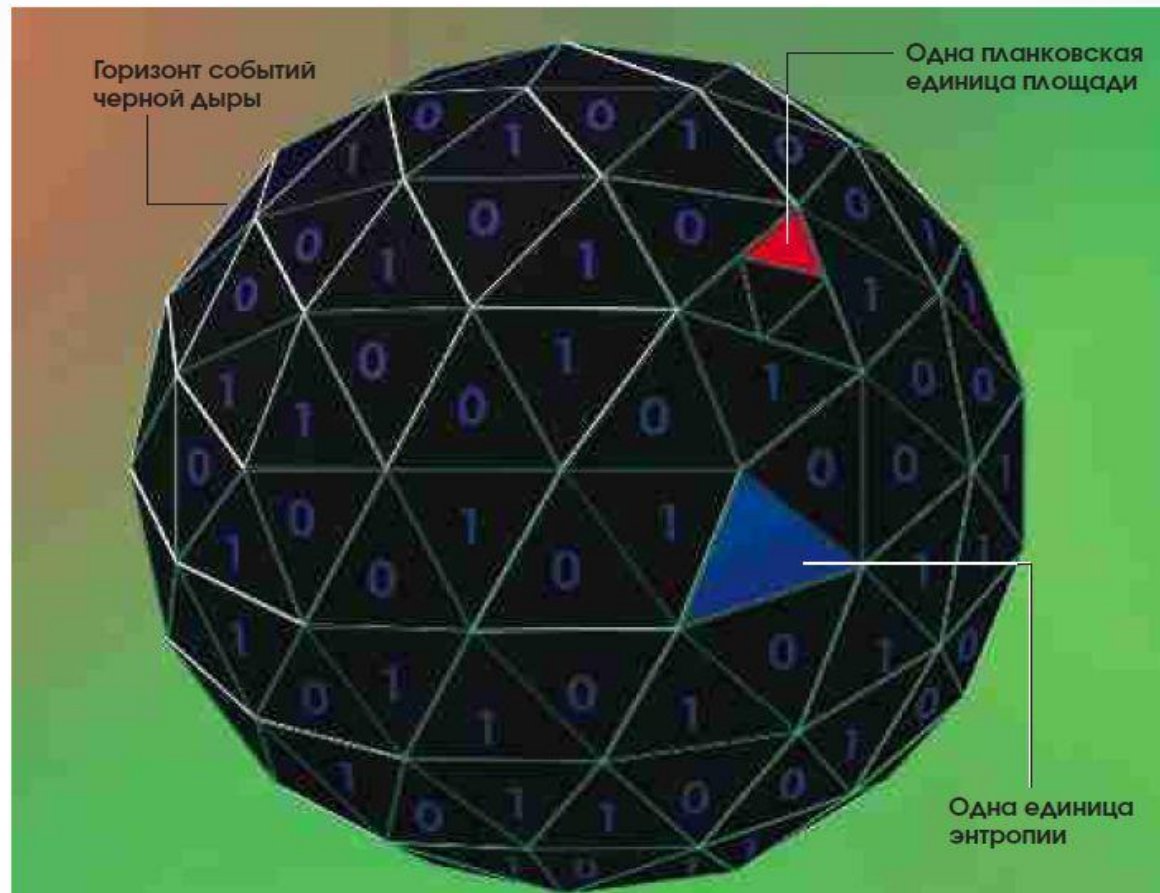
- В 1877 г. австрийский физик Людвиг Больцман определил энтропию как число различных микроскопических состояний, которые может принимать совокупность частиц, составляющая некий «кусочек» вещества, оставаясь на вид той же макроскопической «частью».
- Например, для воздуха в комнате можно рассчитать все возможные пространственные распределения молекул и все их возможные движения.
- В основе формальной теории информации лежит разработка американского математика Клода Шеннона (Claud E. Shannon), опубликованная в 1948 г. Он ввел наиболее употребительную меру информационного содержания – энтропию
- Для описания способа количественного выражения информации, содержащейся, например, в сообщении, Шеннон предложил формулу, совпадающую с формулой Больцмана. По Шеннону, энтропия сообщения – это число двоичных знаков, или битов, необходимое для кодирования данной информации.

# История двух энтропий

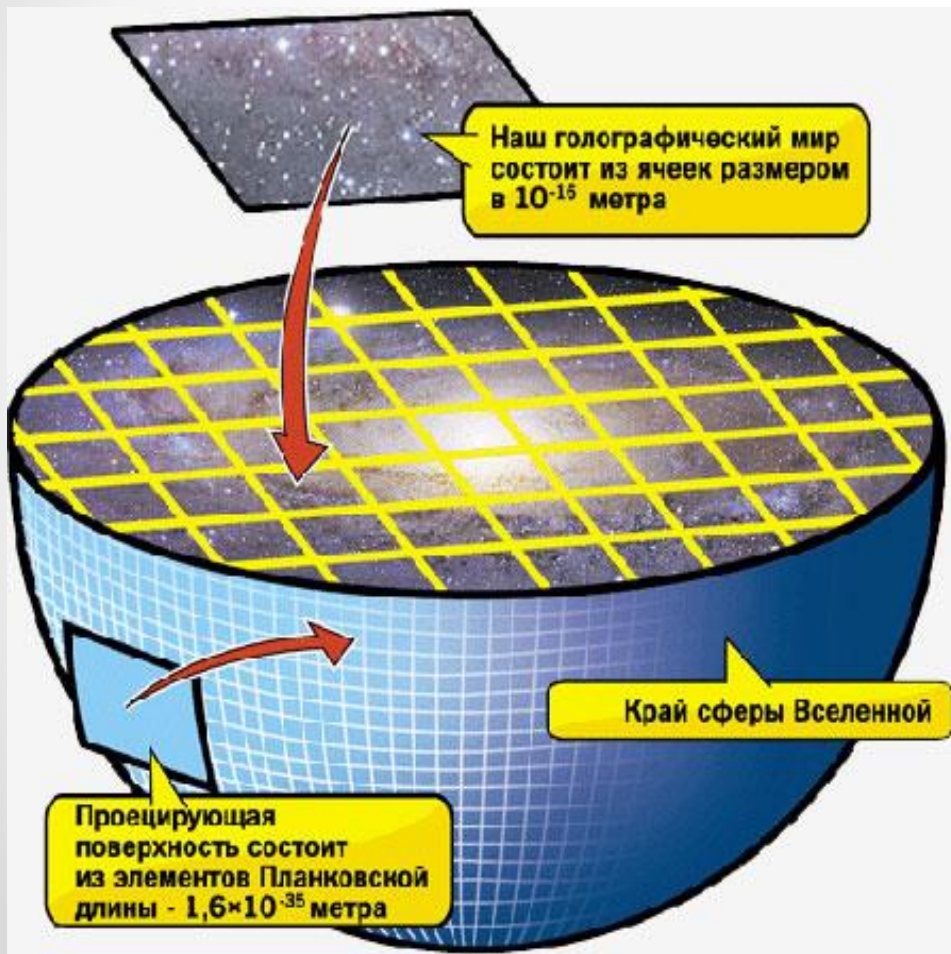
- В концептуальном отношении термодинамическая энтропия и энтропия Шеннона эквивалентны: число распределений, подсчитываемое энтропией Больцмана, отражает количество шенноновской информации, необходимое для реализации любого конкретного распределения.
- Тем не менее есть существенные различия.
- Энтропия, которой пользуются химики, выражается отношением энергии к температуре
- Энтропия Шеннона, используемая специалистами по связи, – числом битов, т.е. величиной принципиально безразмерной.

# История двух энтропий

- Различие объясняется тем, что они рассчитываются для различного числа степеней свободы (это любая величина, которая может изменяться; например, координата, определяющая положение частицы в пространстве.)
- Энтропия Шеннона характеризует только состояние каждого из микроскопических транзисторов. Транзистор может находиться в одном из двух состояний – открытом или закрытом, которым соответствуют двоичные ноль и единица. Значит, он имеет одну двоичную степень свободы, в отличие от термодинамической энтропии, зависящей от состояний миллиардов атомов (и их странствующих электронов), образующих транзистор.
- По мере того, как миниатюризация неуклонно приближает день, когда каждый атом сможет хранить один бит информации, численное значение полезной информационной энтропии микросхемы будет приближаться к значению термодинамической энтропии материала, из которого она изготовлена. Когда обе вычисляются для одинакового числа степеней свободы, они равны.
- Каково предельное число степеней свободы? Атомы состоят из электронов и ядер, являющихся скоплением протонов и нейтронов, которые, в свою очередь, состоят из кварков.



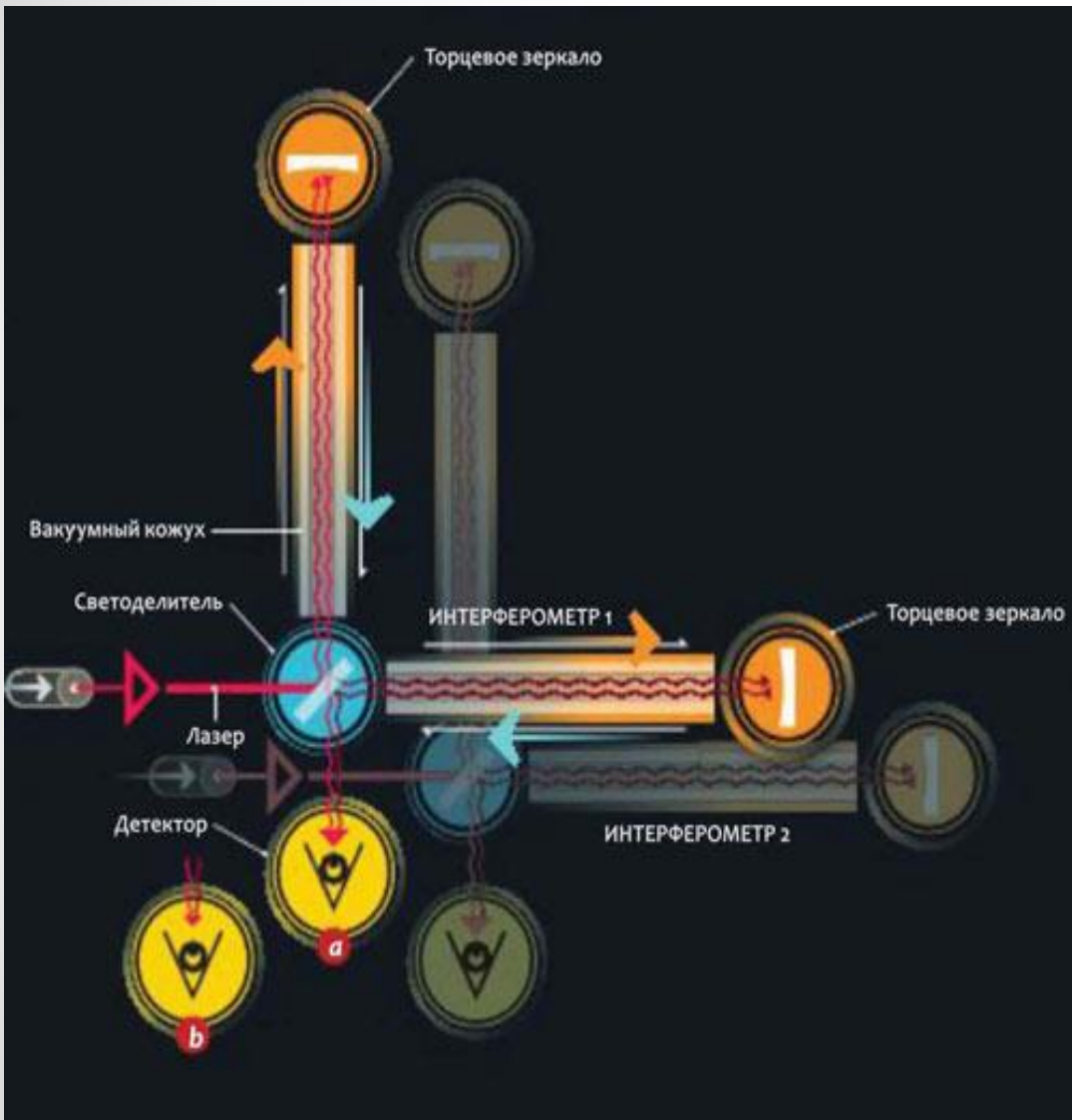
Энтропия черной дыры пропорциональна площади ее горизонта событий. Черная дыра с площадью горизонта событий, равной  $A$  планковских единиц, содержит  $A/4$  единиц энтропии, словно энтропия записана на горизонте событий таким образом, что каждый бит информации соответствует четырем планковским единицам площади.



По мере развития физики элементарных частиц стало очевидно, что голографический принцип Джерардта Хоофта не только удобен как теоретический инструмент для изучения черных дыр, но и применим к пространству-времени любой размерности.

Вселенная в рамках этой теории является трехмерным объектом, представляющим собой внешнюю границу четырехмерного пространства. Теоретические исследования коллектива Хуана Малдасена из Принстонского университета дали результат, прекрасно вписывающийся в голографический принцип: физические законы гипотетической вселенной с пятью измерениями и ее четырехмерной проекцией совпадают.

# Голометр Крейга Хогана



Если в самом мелком масштабе пространство представляет собой что-то вроде пены, то светоделитель пучка, отделяющий один пучок от другого, должен колебаться в продольном направлении. За время, необходимое фотону, чтобы пролететь от лазера по двум световодам туда и обратно, светоделитель сдвинется на расстояние мельчайшей частички в случайном направлении. По прошествии некоторого времени это изменение сформирует сигнал, который будет измерен как шум. Если второй интерферометр измерит шум, имеющий аналогичную картину, то экспериментаторы смогут сделать вывод, что причина шума — дрожание пространства.



# iTime-кристалл Фрэнка Вилчека

- Вилчек обнаружил, что и в классическом, и в квантовомеханическом описании нашего мира, как выяснилось, можно непротиворечиво и математически обоснованно выстраивать структуры кристаллов в 4-м измерении — то есть во времени. Такого рода кристаллы оказываются столь же стабильными, как и кристаллы в 3-мерном пространстве, так как порождаются они системами в своем наиболее стабильном состоянии энергетического минимума.
- Простейшей их реализацией были бы такие системы, геометрия которых позволяет им двигаться по кругу или циклу, возвращаясь в то же место после некоторого времени. Более сложной конфигурацией могло бы быть скопление атомов, свободно двигающихся в 3 измерениях, но периодически возвращающихся на свои исходные позиции». (Из чего логично предполагать, что вращающиеся частицы, атомы и молекулы заведомо порождают кристаллы во времени.)



- Изучив периодическое поведение этих систем в мнимом времени, Вилчек вывел целый ряд важных следствий.
- Формирование таких кристаллов означает, что данный процесс обеспечивает механизм для отсчета времени — поскольку периодическое поведение по своей физической сути подобно маятнику. Можно сформулировать чуть иначе: выявлены признаки механизма тактовых синхроимпульсов в квантовом компьютере-Вселенной.
- Другая интересная особенность конструкции, отмечает Вилчек, это то, что оказывается возможным, похоже, использовать временные кристаллы для реализации квантовых вычислений с нулевыми затратами энергии. Принципиальную возможность компьютеров такого рода — получивших название «обратимые вычисления» — обнаружил физик корпорации IBM Рольф Ландауэр еще в 1961 году. В природе же, как выясняется ныне, такого рода компьютерный принцип, быть может, реализован уже изначально...

# Законы сохранения



Лекция 2

В.Ф.Ежов

# Однако на одних принципах далеко не уедешь. Нужно научиться выводить из них что-то более значимое.

- Обычное изложение механики основывается на трех законах Ньютона. В своем труде "Математические начала натуральной философии" (1687). Ньютон (наряду с Г.В. Лейбницем) был создателем дифференциального и интегрального исчислений, однако при решении механических задач он почти не пользовался этим математическим методом. Он применял геометрический метод. В упомянутой выше книге много чертежей, а стиль решения задач напоминает доказательство геометрических теорем.
- Другое направление в механике возникло после работ Л. Эйлера, в которых был использован метод дифференциального и интегрального исчислений в форме, предложенной Лейбницем. Особое развитие это направление получило в трудах Ж. Лагранжа. Лагранж гордился тем, что в его книге "Аналитическая механика" (1788) нет ни одного рисунка или чертежа.

# Законы сохранения

- Законы сохранения носили характер теорем, но их доказательство до Лагранжа носило искусственный характер

# Вариационное исчисление

- Общая задача вариационного исчисления состоит в том, чтобы среди всех непрерывных дуг  $y = y(x)$ , соединяющих две точки  $P_1(x_1, y_1)$  и  $P_2(x_2, y_2)$  плоскости и имеющих непрерывно поворачивающиеся касательные, найти такую дугу, для которой не обращающийся в бесконечность интеграл

$$J = \int_{x_1}^{x_2} f(x, y, y') dx \quad \left( y' = \frac{dy}{dx} \right)$$

- принимал экстремальное значение.
- В 1744 Л.Эйлер опубликовал теорему, ставшую основой всего вариационного исчисления: всякая функция  $y$ , обращающая в минимум или максимум интеграл  $J$ , должна удовлетворять дифференциальному уравнению

$$\frac{d}{dx} f_{y'} = f_y.$$

- Решением такой задачи будет, например:

$$y = \frac{b}{2} \left[ e^{\frac{x-a}{b}} + e^{\frac{-x+a}{b}} \right],$$

# Законы сохранения

- Основные интересы молодого Лагранжа лежали в области изопериметрических задач – иными словами вариационного исчисления. Он усовершенствовал вариационную схему Эйлера, благодаря открытому им способу вычисления вариации интеграла путем
- Интегрирование по частям,
- Доказательство перестановочности  $\int \delta$  ,
- а также перестановочность и  $\int$  и  $\delta$  .  $d$  и  $\delta$

- Рассмотрим подробнее. Действие определяется через функцию Лагранжа:

$$L(\dot{q}, q, t) = T - V = \frac{m\dot{q}^2}{2} - V(q) \quad S = \int_{t_1}^{t_2} L(\dot{q}, q, t) dt$$

- Согласно принципа наименьшего действия система движется между двумя точками таким образом, что действие имеет экстремум, т.е.

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2} [L(\dot{q} + \delta\dot{q}, q + \delta q, t) - L(\dot{q}, q, t)] dt = 0$$

- Рассмотрим первый член:

$$L(\dot{q} + \delta\dot{q}, q + \delta q, t) = L(\dot{q}, q, t) + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta\dot{q} + \frac{\partial L}{\partial q} \delta q$$

- тогда после подстановки получаем:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta\dot{q} + \frac{\partial L}{\partial q} \delta q \right) dt = 0$$

$$\int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q} + \frac{\partial L}{\partial q} \delta q \right) dt = 0$$

- Рассмотрим первый член подинтегрального выражения

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta \dot{q}$$

- Проинтегрируем его по частям и используем то, что

$$\delta \dot{q} = \frac{d}{dt} \delta q$$

- а также перестановочность  $\int$  и  $\delta$

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \frac{d}{dt} \delta q dt = \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \delta q \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \delta q \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} dt$$

- **Первый член в этом уравнении равен 0, т.к. вариация координат в момент времени  $t_1$  и  $t_2$  равна нулю.** После подстановки в (1) получаем:

$$\int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} \right) \delta q dt = 0$$



$$\int_{t_1}^{t_2} \left( \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} \right) \delta q dt = 0$$

- Для равенства нулю этого интеграла необходимо, чтобы подинтегральное выражение было равно нулю. Получаем уравнения движения Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

- Данное выражение есть ничто иное, как второй закон Ньютона. Вспомним, что

$$L = T - V = \frac{mv^2}{2} - V(x)$$

(здесь  $x \leftrightarrow q$  и  $v \leftrightarrow \dot{q}$ ).

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \Rightarrow m\dot{v} = ma$$

$$\frac{\partial L}{\partial q} \Rightarrow \frac{\partial V}{\partial x} = F$$

# Дальнейшее продвижение на этом пути позволяет сформулировать из первых принципов законы сохранения.

Функция Лагранжа не зависит явно от времени. К чему это приводит?

$$\frac{dL}{dt} = \frac{\partial L}{\partial q} \dot{q} + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \ddot{q} = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \dot{q} + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \ddot{q} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \dot{q} \right)$$

при выводе были использованы уравнения движения Лагранжа.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = 0$$

Полученное равенство может быть переписано в виде:  $\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \dot{q} - L \right) = 0$

Поскольку функция Лагранжа

то  $\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \dot{q} = m\dot{q}^2 = 2T$

$$L(\dot{q}, q, t) = T - V = \frac{m\dot{q}^2}{2} - V(q)$$

а выражение

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \dot{q} - L = 2T - T + V = W$$

не что иное, как энергия. Таким образом, мы вывели закон сохранения энергии.

Т.о. если хотите создать теорию, в которой нарушается закон сохранения энергии, нужно ввести явную зависимость от времени в лагранжиан. Это эквивалентно неоднородности времени.

# Рассмотрим, к чему нас приведет требование однородности пространства.

Рассмотрим параллельный перенос координат  $q$  на величину  $\varepsilon$ .  
Это означает, что

$$\delta q = \varepsilon$$

Т.о. требование  $\delta L = \frac{\partial L}{\partial q} \delta q = \varepsilon \frac{\partial L}{\partial q} = 0$

приводит к  $\frac{\partial L}{\partial q} = 0$

или с учетом уравнений Лагранжа

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = 0$$

Т.о. получаем, что  $\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = P = const$

Закон сохранения импульса эквивалентен требованию  
однородности пространства.

1. Аналогично можно показать, что закон сохранения момента импульса соответствует изотропии пространства, т.е. повороту пространства как целого.

# Законы сохранения и изучение природы

- В физике изучают законы изменений, происходящих в природе, а законы сохранения говорят о том, что не меняется, остается постоянным!
- Ценность законов сохранения в том, что они «нечувствительны» к деталям процесса.
- Какова эффективность изучения законов сохранения?
- $E_k + E_p = \text{const}$
- В процессе движения системы всякое увеличение кинетической энергии системы должно сопровождаться соответствующим уменьшением её потенциальной энергии и наоборот
- Течение реки на расширении замедляется, т.е. падает кинетическая энергия, значит растет потенциальная

# Даниил Бернулли (1700-1782)

**Закон (уравнение) Бернулли является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной несжимаемой жидкости:**

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}$$

**Здесь**

**$\rho$  — плотность жидкости,**

**$v$  — скорость потока,**

**$h$  — высота, на которой находится рассматриваемый элемент жидкости,**

**$p$  — давление в точке пространства, где расположен центр массы рассматриваемого элемента жидкости,**

**$g$  — ускорение свободного падения.**



**Первое и второе слагаемое в интеграле Бернулли имеют смысл кинетической и потенциальной энергии, приходящейся на единицу объёма жидкости.**

**Третье слагаемое по своему происхождению является работой сил и не представляет собой запаса какого-либо специального вида энергии («энергии давления»).**

Этим явлением объясняется и возникновение подъемной силы, действующей на крылья самолета.



# Итак, мы пришли к тому, что главное это написать правильно Лагранжиан

- Принцип наименьшего действия позволяет легко согласовать теорию с принципом относительности.
- Попробуем теперь описать релятивистскую механику невзаимодействующих частиц. В этом случае мы должны взять лагранжиан в виде (Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц «Теория поля»):

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- Из этого лагранжиана могут быть получены уравнения движения невзаимодействующих частиц в релятивистском виде.
- Взаимодействие частиц друг с другом можно описывать с помощью силового поля. Т.е. вместо того, чтобы говорить о том, что одна частица действует на другую, будем считать, что частица создает вокруг себя поле, а на всякую другую частицу в этом поле действует некоторая сила.



# Лагранжиан для заряда, движущегося в электромагнитном поле:

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + \frac{e}{c} \vec{A} \vec{v} - e\varphi$$

- Здесь добавился член, описывающий взаимодействие заряда с полем.
- Полный же лагранжиан должен содержать член, соответствующий энергии самого поля.

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + \frac{e}{c} \vec{A} \vec{v} - e\varphi + \frac{1}{8\pi} \int (E^2 - H^2) dV$$

- До сих пор мы обсуждали различные симметрии пространства, как такового. При рассмотрении же пространства, заполненного каким-либо полем, возникают новые симметрии.
- Калибровочные преобразования (эл.-маг. потенциалы – эл.-маг. поля, для поддержания физической картины неизменной преобразование, переводящее один набор потенциалов в другой одновременно действует на поле)  
З.с.з. (фактически инвариантность относительно квантовомеханической фазы)

# Софус Ли

- Истинный смысл лагранжева метода стал понятен лишь после работ Ли. Ли занимался применением теории групп к интегрированию дифференциальных уравнений. Он связал соотношение между симметрией и сохранением с теорией канонических преобразований. С каждой однопараметрической подгруппой группы связан некий первый интеграл исследуемой механической системы. Этот интеграл совпадает с производящей заданных преобразований, т.е. их генератором.

•

•

•

# Теорема Нетер (Эмили Нетер)

## 1918 г.

- Сформулировала теорему для физической системы, уравнения движения которой имеют форму системы дифференциальных уравнений, получаемых из вариационного принципа механики.
- Каждому непрерывно зависящему от одного параметра преобразованию, оставляющему инвариантным действие соответствует закон сохранения.

# Эмми Нётер



Труды Нетер по алгебре способствовали созданию нового направления, названного общей алгеброй. Сформулировала фундаментальную теорему теоретической физики, которая устанавливает связь между свойствами симметрии физической системы и законами сохранения. Если свойства системы не меняются при каком-либо преобразовании переменных, то этому соответствует сохранение некоторой физической величины. Так, независимости свойств системы от выбора начала отсчета времени соответствует закон сохранения энергии.

# Симметрия в физике

- Пьер Кюри
- Когда некоторые причины производят известное действие, то элементы симметрии причины должны проявляться в произведенных действиях.
- Для возникновения некоторого явления необходимо, чтобы в среде либо исходно существовала диссимметрия, соответствующая диссимметрии этого явления, либо такая диссимметрия возникла под действием другой причины, например, под действием механических усилий, поскольку диссимметрия среды и действия складываются.

•

•

•

•



# Пьер Кюри

Пьер Кюри (1859 -1906) г. родился в Париже, в семье врачей, шестнадцати лет от роду, получил ученую степень бакалавра Сорбонны, а два года спустя -степень лиценциата (*эквивалентную степени магистра*) физических наук. В 1878 г. Пьер Кюри стал демонстратором в физической лаборатории Сорбонны, где занялся исследованием природы кристаллов.



В 1878 г. началась совместная работа Пьера и Жака Кюри. Ж. Кюри работал в то время в минералогической лаборатории Сорбонны ассистентом профессора Фриделя. Вскоре два юных физика (Пьеру было 21 год, Жаку -- 24) сделали важное открытие -- явление пьезоэлектричества.

**Было ли это открытие случайным, или существование явления пьезоэлектричества было ими предугадано?**

П. Кюри постоянно руководствовался соображениями о симметрии, и к открытию пьезоэлектричества его привели размышления этого рода. Хотя работы по симметрии были опубликованы им значительно позднее 1880 г.



# Открытие пьезоэлектричества

- Рассмотрим симметрию электрического поля. Пусть электрическое поле создается круглыми пластинками, расположенными одна напротив другой. В этой системе имеется ось симметрии и всякая плоскость, проходящая через эту ось, есть плоскость симметрии. Таким образом, симметрия электрического поля есть симметрия усеченного конуса (оно не обладает симметрией относительно отражений в плоскости перпендикулярной оси).
- Рассмотрим, например, центральносимметричный кристалл. Под действием механических усилий можно понизить его симметрию только до цилиндрической симметрии, которая остается выше симметрии электрического поля. Из этого следует, что пьезоэффект эффект для такого кристалла невозможен. Именно на основании рассуждений подобного рода Кюри выбрали для исследований нецентросимметричный кристалл кварца, принадлежащий к гексагональной кристаллографической системе.}

# Дискретные (отражения)

- P - инверсия (симметрия левого и правого)  
Спиральность.  $(x, y, z \rightarrow -x, -y, -z)$
- T - обращение времени ( $t \rightarrow -t$ , Перестановка начального и конечного состояний)
- C – зарядовое сопряжение (частица  $\rightarrow$  античастица)
- CPT = 1 (Соответствует лоренц инвариантности в локальной теории поля)
- Перестановка одинаковых атомов или одинаковых частиц
- **Всем этим симметриям соответствуют законы сохранения**

