



# Курс: Цифровые технологии в научных исследованиях

## ЛЕКЦИЯ 7 «ИНФОРМАЦИЯ КАК ОТРАЖЕННОЕ РАЗНООБРАЗИЕ»

19.110.2020



ПОЛИТЕХ

# ПАРАДИГМА КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Cognito (мыслю) ergo sum**

Р. Декарт  
**1650**

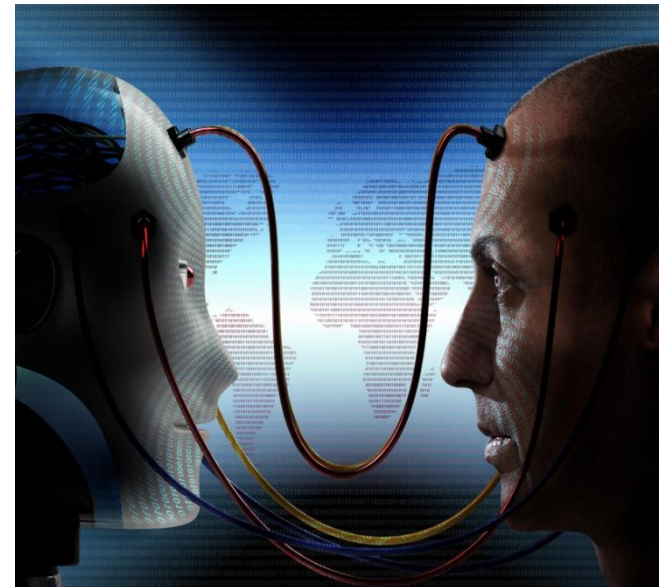
на

**Computo (вычисляю) ergo sum**

СКЦ «Политехнический»  
**2016**



**Что это дает:** от реальности к виртуальности  
- цифровая имитация физических процессов,  
когнитивных функций и «вычисление»  
целеполагания



- Р. Пенроуз (1989) «Ключевой идеей, ведущей к «объединению» гравитации и квантовой теории, может стать **изучение Природы** не в терминах материи и энергии, а **в терминах информации**».
- Б.Б. Кадомцев (1999) «При переходе к изучению сложных систем именно структурные, информационные аспекты их поведения выступают на первый план, а **динамика создает лишь основу для информационного развития**».
- И. Чанг (2000): «Мы научились думать о вычислениях физически, теперь мы должны научиться **думать о физике в терминах информации**».



## Принцип Неопределенности Гейзенберга

В классической физике, построенной на ньютоновских принципах и применимой к объектам нашего обычного мира, мы привыкли игнорировать тот факт, что **инструмент измерения**, вступая во взаимодействие с объектом измерения, **воздействует** на него и **изменяет** его свойства. Собственно, измеряемые величины.

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi}$$

$\Delta E$  — неопределенность энергии частицы,  $\Delta t$  — неопределенность времени, когда она владеет этой энергией, а  $h$  — постоянная Планка умноженная на  $\pi$ .



Вернер Карл Гейзенберг (5 декабря 1901— 1 февраля 1976)

- Для осуществления одной логической операции за время  $\Delta t$  требует в среднем  $E \geq \pi \hbar / 2 \Delta t$  джоулей энергии
- Если система обладает энергией  $E$ , то может произвести максимум  $2E / \pi \hbar = 1 / \Delta t$  логических операций за секунду
- Так вычислитель весом 1 кг обладает энергией  $E = mc^2 = 8.9874 \cdot 10^{16}$  J. Значит он может произвести

$$2mc^2 / \pi \hbar = 5.4258 \cdot 10^{50} \text{ операций в секунду}$$

Греческое слово «парадейгма» - **норма, образец**, происходит понятия **парадигма** — «базис» знаний, интегрирующий в себе теории, концепции, способы описания и используемые модели.



**Наука 1.0. Парадигма** – организованная простота: рассмотрение процессов в замкнутых систем - измерения не меняют состояние измеряемого объекта - законы Природы – следствие принципа достаточного основания.

Итак: Свойства изучаемых объектов дается в терминах пространственно-временных координат и траекторий. «Царица» науки – механика.

**Наука 2.0.** Парадигма – организованная сложность.  
Рассмотрение открытых систем, взаимодействующих с окружением - измерения (наблюдения) меняют свойства изучаемого объекта - законы природы – следствие принципа дополнительности в форме корпускулярно-волнового дуализма.  
Итак: состояние изучаемых объектов дается в терминах свойств волновой функцией – математического выражения для распределения вероятностей различных объективно возможных состояний объекта. «Царица» науки - квантовая ( волновая) механика.

# ВЕРОЯТНОСТЬ – КАК МЕРА «ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ»

**Классическая вероятность** характеризует меру незнания того, что вещь находится в одном из конкретных состояний. Измерение состояния объекта эту «конкретность» не нарушает.

**Принцип дополнительности:** процессе познания для воспроизведения целостности объекта необходимо применять взаимоисключающие, "дополнительные" классы понятий.

**Квантовая вероятность** характеризует «дополнительность» состояний, то есть одновременное пребывание объекта в различных взаимно исключающихся состояниях, но с разными вероятностями.



## Почему нужна новая парадигма ?

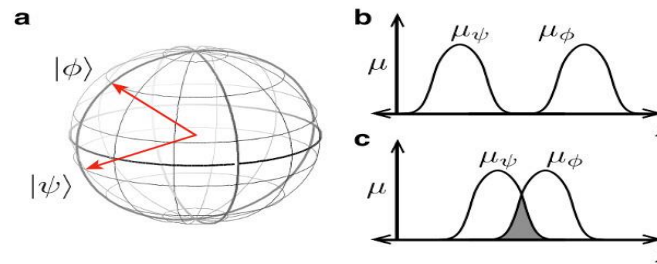
**Информация** как мера разнообразия является неотъемлемой частью Природы. Информация неразрывно связана с массой, энергией (скалярная мера), структурой и формой ( ультра мера).

Носителем информации являются неоднородности массы или энергии, которые устойчивы. Информацию можно рассматривать также неоднородности любой физической природы ( текст, ноты, слова...).

- Поэтому логично изучать свойства пространства и времени методами, в которых используется понятие информации
- «Царица» наук - киберфизика, или информационная физика («Физическая информатика»)...

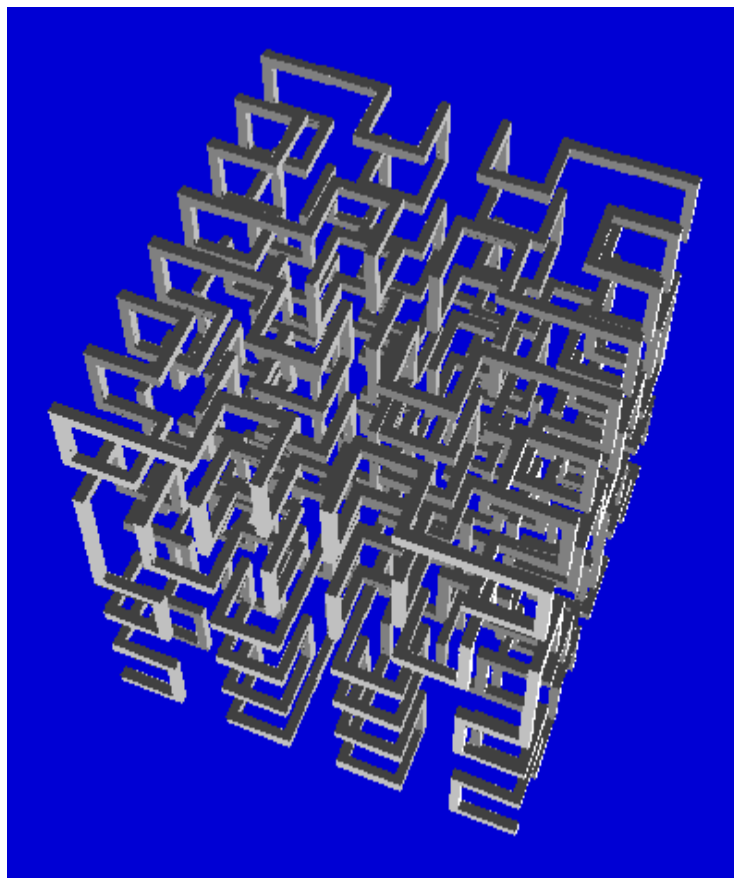
- Информационные законы Природы позволяют понять причины отсутствия симметрии Вселенной («тепловой смерти»), необратимость физических процессов взаимодействия на макро и микро уровнях описания материи.
- Ограничения на симметрию Вселенной и физические преобразования определяют физические законы сохранения: энергии, импульса, момента импульса, заряда, а также характеристики возникающих при расширении Вселенной частиц и полей.
- Неоднородности (информация) порождают различные типы взаимодействия, частицы и соответствующие им поля, атомы, молекулы, галактики, звезды, планеты, а также ... жизнь,...

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ:



- **неопределенность состояний** сложной физической системы) (состояние - вектор в гильбертовом пространстве);
- **информационная емкость материи** ( бит/кг или Моль - количество вещества, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. )
- **Количество структурных элементов** в одном моле вещества называется числом Авогадро, обозначаемой обычно как  $N_A$ . В углероде-12 массой 0,012 кг содержится  $N_A$  атомов .

# ОСНОВАНИЯ «СИСТЕМНОГО ПОДХОДА»: СЛОЖНАЯ СИСТЕМА – ЭТО ...?



## Постулат 1

**Состояние изолированной квантовой системы описывается единичным вектором комплексного гильбертова пространства.**

- Состояние квантового бита в 2-мерном комплексном гильбертовом пространстве описывается единичным вектором (в обозначениях Дирака)

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — комплексные коэффициенты, называемые **амплитудами** базисных состояний  $|0\rangle$  и  $|1\rangle$  и

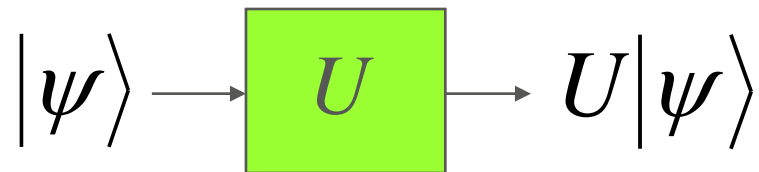
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

- В алгебраических обозначениях

$$\begin{pmatrix} \psi_0 \\ \psi_1 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \beta \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

## Постулат 2

Эволюция замкнутой квантовой системы описывается унитарным оператором  $U$ .  
(Оператор  $U$  унитарный, если  $U^\dagger = U^{-1}$ .)

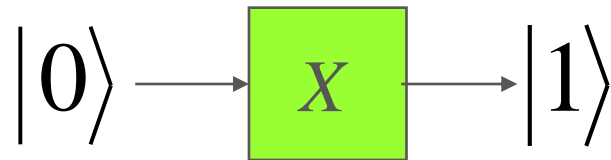


**СОСТОЯНИЕ  
СИСТЕМЫ В  
МОМЕНТ ВРЕМЕНИ  $t_1$**

**СОСТОЯНИЕ  
СИСТЕМЫ В  
МОМЕНТ  
ВРЕМЕНИ  $t_2$**

## Операторы Паули

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$



**В линейной алгебре  $X|0\rangle = |1\rangle$   
эквивалентно**

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$



## Матричное представление оператора

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Действие  $H$  на состояния вычислительного базиса:

$$H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)$$

$$H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle)$$

Заметим, что  $HH = I$ .

## Постулат 3

Пространство состояний составной системы представляет собой тензорное произведение пространств состояний входящих в нее систем. Если одна система находится в состоянии  $|\psi_2\rangle$  а другая система — в состоянии  $|\psi_1\rangle$ , то составная система находится в состоянии

• 
$$|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Вместо  $|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$  часто пишут  $|\psi_1\rangle|\psi_2\rangle$  или  $|\psi_1\psi_2\rangle$

•

## Постулат 4

Квантовые измерения описываются набором операторов  $\{M_m\}$ , действующих на пространстве состояний системы. Если состояние системы до измерения  $|\psi\rangle$ , то вероятность получения результата  $m$  составляет

$$p(m) = \langle \psi | M_m^\dagger M_m | \psi \rangle$$

а состояние системы после измерения —

$$\frac{M_m |\psi\rangle}{\sqrt{\langle \psi | M_m^\dagger M_m | \psi \rangle}}$$

Операторы измерения удовлетворяют **уравнению полноты**:

$$\sum_m M_m^\dagger M_m = I$$

Уравнение полноты говорит о том, что **сумма вероятностей равна единице**:

$$\sum_m p(m) = \sum_m \langle \psi | M_m^\dagger M_m | \psi \rangle = 1$$

## **Закон простоты сложных систем:**

Реализуется тот вариант сложной системы, который обладает наименьшей сложностью.

Следствия:

- «бритва Оккама» - самое простое объяснение является самым верным;
- иерархическое модульное построение сложных систем;
- симметрии устойчивых структур;
- экстремальный характер неопределенности (функции распределения параметров, имеющих неопределенные значения, имеют экстремальный характер – у функции имеется экстремум).

- **Закон сохранения неопределенности (информации) :**

Неопределенность изолированной (замкнутой) системы сохраняется при любых физически реализуемых преобразованиях, если оператор преобразования линейный, а значение определителя такого оператора равно единице.

Следствие:

- Закон конечности информационных характеристик сложных систем.
  - Все виды взаимодействия между системами, их частями и элементами имеют конечную скорость распространения, скорость изменения состояний элементов системы ограничена, информация о событии или координате всегда конечна, длительность сигнала всегда больше нуля.

Итак, для эффективного функционирования разнообразие системы управления должно быть не менее разнообразия объекта управления.

## Следствие

- теорема Шеннона,
- теорема Котельникова,
- теорема Холево (верхняя граница количества информации, извлеченной из квантовых состояний). Одна двоичная единица информации соответствует энергии равной постоянной Больцмана, умноженной на температуру
- теорема Марголиса–Левитина: computation rate cannot be higher  $6 \times 10^{33}$  operations per second per [joule](#) ,
- теоремы Геделя о неполноте (неопределенность неустранима).