



курс: Архитектура суперкомпьютеров

**лекция 5**  
**Может ли супер-вычислитель стать  
цифровым мозгом**

24 октября  
2024



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого

## Предисловие (1)

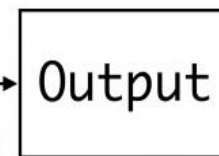
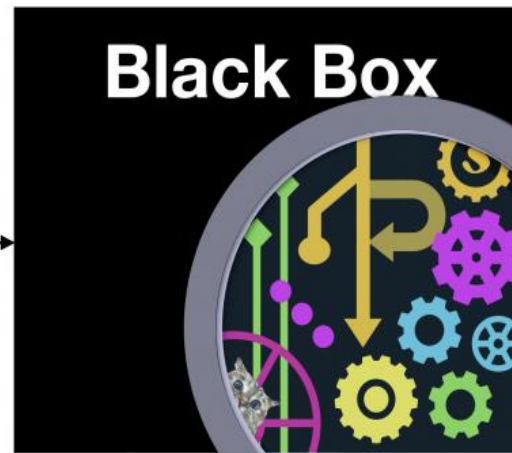
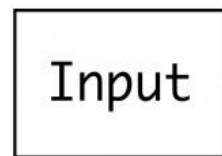
- Нобелевская премия 2024 года по физике вручена за «за основополагающие открытия и изобретения, которые позволяют осуществлять **машинное обучение** с использованием искусственных нейронных сетей».
- какие же физические феномены воплощены в суперкомпьютерах и искусственных нейронных сетях ?
  - нейросети — «командная» структура, в которой алгоритм вычислений **«программирует» не каждый нейрон в отдельности, а вся сеть в целом.**
  - программной вычислений является «вся сеть» .
  - Сеть суть трансформер: в процессе вычислений информация со входа преобразуются в выходные данные

Какой же из известных в физике законов сохранения применим к процессам обучения и вычислений ???

# Введение

Для многих «компьютер» это «черный ящик», на который можно воздействовать не физической силой, а «кодом»... то есть программировать и ... даже «обучать» компьютер. Однако, каков «внутренний» процесс превращения текста программы в численный результат почти никого не интересует кроме ...нас – специалистов компьютерных наук

**Вход** – данные +  
исполняемый код  
программы вычислений



Вопрос: что такое программный «код» с точки зрения физики ?

**Выход** – числа кодирующие результат и статус решения (успешно не успешно) завершились программы вычислений

# Конец эры «МТ» и «закона Мура».... да здравствует «Машина Геделя»

- Закон Мура - является эмпирическим наблюдением, суть которого заключается в том, что каждые 24 месяца количество транзисторов в интегральной схеме удваивается
- Но последние несколько лет Закон Мура перестал выполняться, так как все параметры современных процессоров стали выходить на физическое «плато» масштабируемости
  - тактовой частоты (скорость работы транзистора) рост прекратился в 2010 году на отметке 5 ГГц (5 миллиардов циклов в секунду).
  - мощности микропроцессора (около 200 Вт).
- Производительность компьютеров теперь наращивается за счёт количества ядер в микропроцессоре и их оптимизации по отношению к различным классам алгоритмов, а также за счёт программного обеспечения.

# «Современные компьютерные технологии»: Проблема №1

«Углеродный след» компьютерных технологий :

год	число ядер	$R_{\text{реак}}$ , ПФлопс	$R_{\text{max}}$ , ПФлопс	эл. мощность, МВт
2022 Frontier	8,700,XXX	1680.XX	1100.XX	21
2020 Fugaku	7,300,XXX	513.XX	415.XX	28
2010 Tianhe-1	186,XXX	4.7X	2.6X	4
2000 ASCI Intel	9,6XX	0.03	0.02	-

- 1 кг угля -> 3 кВтч =0.003 МВтч
- 1 тонна угля -> 3 МВтч

21 МВт ->  $21/3 =$   
7 тонн угля в час  
168 тонн угля в день  
**60480 тонн угля в год**

Причины:

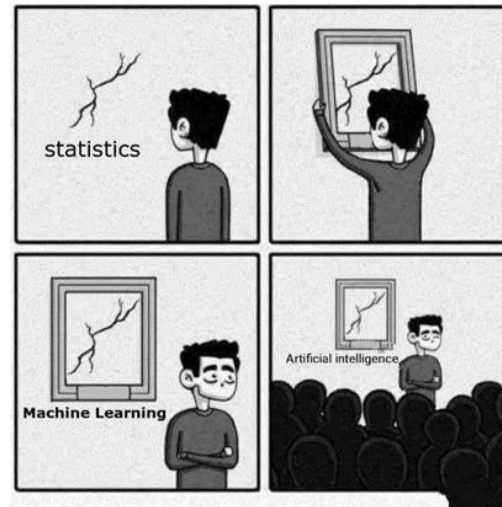
- Большая потребляемая мощность
- Сложность УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ планирования вычислений
- Низкая масштабируемость вычислительных ресурсов при решении прикладных задач

# Современные компьютерные технологии: Проблема №2

## «Сложность программирования суперкомпьютеров»

Для пользователей почти всегда сам СК «**черный ящик**», а для «самого СК» – задачи пользователей - «каждый раз совершенно «новые».

Задачи  
пользователей



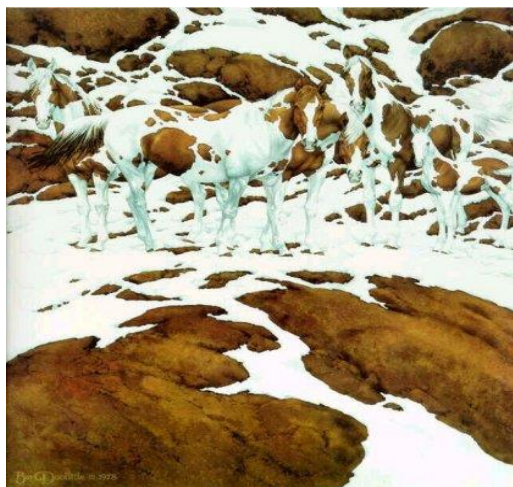
Результаты  
вычислений

Типичный вопрос пользователя - как повысить скорость решения своих прикладных задач?  
Решение проблемы: сделать так, чтобы на вопрос пользователей мог ответить «сам СК» ?

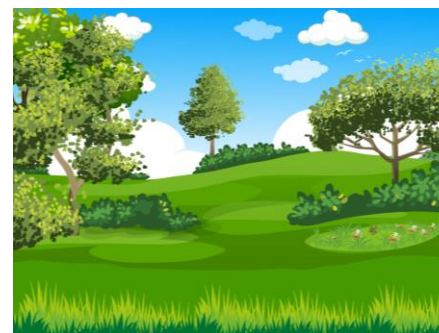
# Современные цифровые технологии : Проблема №3:

« У ЧЕЛОВЕКА НЕТ ИНТУИЦИИ ЧИСЛА, ВЫЧИСЛЕННЫЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРА РЕЗУЛЬТАТЫ НАДО ... ОБЪЯСНИТЬ»

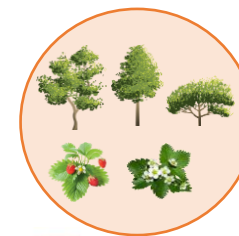
- **РЕШЕНИЕ – ОБЪЕДИНЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИИ -> СОЗДАНИЕ МУЛЬТИМОДАЛЬНЫХ ЭКЗО-ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ, ИНТЕГРИРУЮЩИХ ВОЗМОЖНОСТИ ФОРМАЛЬНОГО И ИНТУИТИВНОГО НАЧАЛ**



Ограниченность  
объема знаний  
субъекта



Мультиmodalность  
принимаемых решений



Скрытность смыслов

Дескрипторы «похожести»:

числовое равенство /с точностью до количеств  $1+2=3$

эквивалентность /с точностью до значения  $1.0000=1$

гомеоморфность /с точностью до классов

# «Искушения» компьютерных наук (КН)

Искушение - суть побуждение нарушить объективные законы

90-е годы 20 века: задачу решим на компьютере («действие» - код , **КТО** напишет ???)

20-е годы 21 века: задачу решит ИИ («действие» - рекурсия по нумерации Геделя, **КТО** «научит» ???)

На пути «разрешимости» искушений КН лежит «принцип хрупкости «хорошего»

Сформулированный ак. В. И. Арнольдсом: ... при малом изменении параметров системы более вероятен переход в область неустойчивости, чем в область устойчивости.

Практическая интерпретация принципа «хрупкости»:

- всё «хорошее» (например, правильно написанная программа) более «хрупко» (в смысле вероятности), чем любое «плохое» (вид вероятностного распределения),

В КН «хрупкое» понятие «хорошая программы» Это понятие было вытеснено «плохими» понятиями «вычислимость, перечислимость, разрешимость», которые носят условный характер , а условия задают «границы» понимания результата пользователем, а не объективные законы физики



## Суперпозиция Физическое / информационное взаимодействие : роль «кота Шредингера» в компьютерных вычислениях

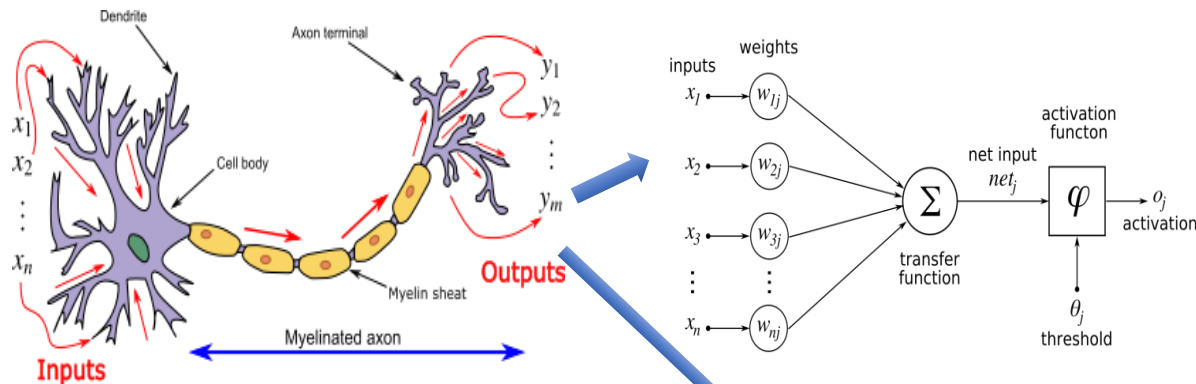


Суть проблемы суперпозиции состояний – соотношение непрерывного (возможного) и дискретного (состоявшегося):

Считается, что прямых аналогов квантово-механических систем в макромире не существует...

А что будет, если в описание программы вычислений явно включить информационный фактор и **рассматривать результаты вычислений как суперпозицию** состояния компьютера как **физической системы** и «информационного воздействия» - результата **выполнения программы** ?

# Биологический нейрон супер-вычислитель : мембраны нейрона обладают избирательной проницаемостью.



Модель N1: искусственный нейрон параметрическая модель избирательной проницаемостью не обладает .

В клеточные мембраны встроены различные специфические рецепторы — белки или гликопротеины, распознающие определенные молекулы (лиганды). Это значит, что молекулы и ионы проходят через мембрану с различной скоростью СВОЙСТВА КЛЕТОЧНОЙ МЕМБРАНЫ как трансформера:

1. Обладает избирательной проницаемостью, которая изменяется при различных состояниях клетки
2. Имеет каналы, через которые проникают ионы:
  - Потенциал-зависимые каналы — открываются при изменении разности потенциалов;
  - Потенциал-независимые (лигандозависимые, гормонрегулируемые) — открываются при взаимодействии рецепторов с веществами.

$q$  – query - запрос  
 $k_i$  – key - ключ  
 $v_i$  – value – значение

$$y = \sum_{i=1}^N \alpha(q, k_i) v_i$$

«ядро» модели

$$\alpha(q, k_i) = \text{softmax}_i \left( \text{score}(q, k_j) \right)_{j=1}^N$$

Модель N2: искусственный нейрон непараметрическая модель избирательной проницаемостью обладает

Принцип цифрового моделирования: модель получает сигналы «x» от других нейронов и «вычисляют» пороговую функцию выходного сигнала «y», которая передается в другие нейроны ИНС. Принцип когнитивного моделирования: прогнозирования + объяснение вычисляемых решений

# суперкомпьютер как ... трансформер возможных счетных состояний

## ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНЕЧНОЕ МНОЖЕСТВО ПАРАВИЛЬНЫХ ОТВЕТОВ

Деревья классификации возможных состояний системы

Имеется 1)

**обучающая выборка**  $(x_j, y_j)$ , где  $x$  – вектор признаков (давление, частота с/с),  $y$  – **реакция организма** (вычисленные индексы Робинсона, Старра, Кердо....),

2) индексы  $j \in J_k(x)$ , попадают совместно с вектором признаков  $x$  в один и тот же  $p$ -й лист  $k$ -го дерева классификации.

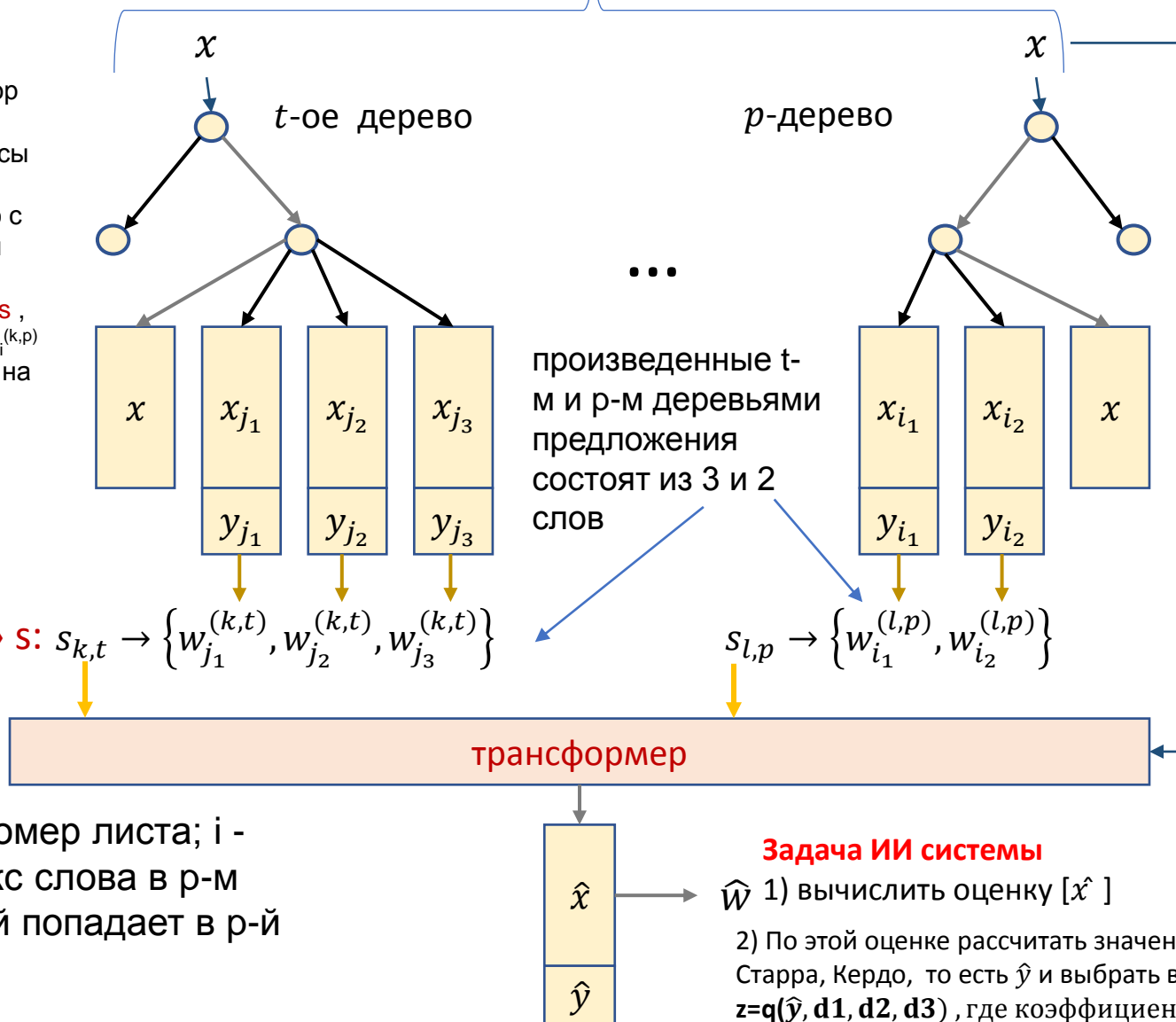
$(x_j, y_j)$ , представим в виде **предложения**  $s$ , состоящего из слов, обозначаемых как  $w_i^{(k,p)} \in J_k(x)$ , из этих слов «собрать» диагноз и на основе клинического опыта «выбрать» корректирующее воздействие, которое «подать на организма пациента.

$i \in J_k(x)$ ,

$$s_{k,p} = \{nw_{i1}^{(k,p)}, \dots, w_{ip}^{(k,p)}\}_{1ir}$$

**«Предложение»**  $s: s_{k,t} \rightarrow \{w_{j_1}^{(k,t)}, w_{j_2}^{(k,t)}, w_{j_3}^{(k,t)}\}$

$k$  - номер дерева;  $p$  - номер листа;  $i$  - индекс примера (индекс слова в  $p$ -м предложении), который попадает в  $p$ -й лист.



ИЗ КАЖДОГО «ЛИСТА» ДИРЕКТЬЕВ МОЖЕТ ВЫХОДИТЬ РАЗНОЕ КОЛИЧЕСТВО «ВЕТВЕЙ»:

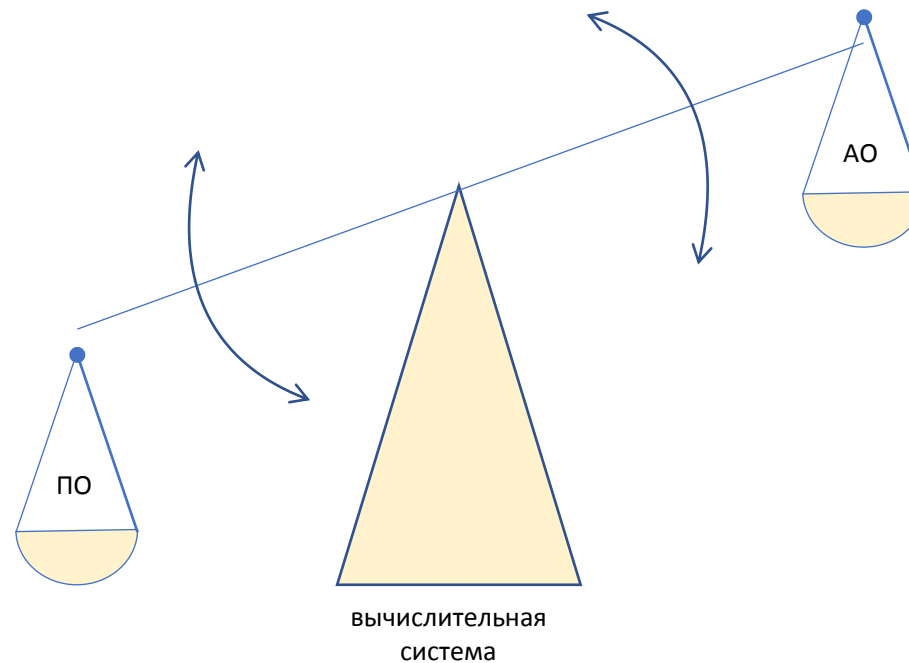
- 1) из листа  $t$ -ого дерева выходит три «слова» описания реакции, организма, а из листа  $p$ -дерева выходит описание, состоящее из двух «слов»
- 2) На вход системы подается текущий вектор « $x$ » и соответствующие ему значения индексов Робинсона, Старра, Кердо.

### Задача ИИ системы

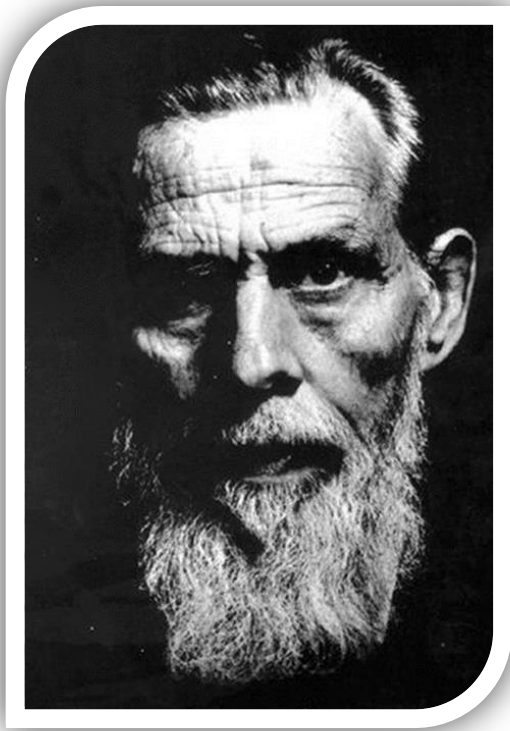
- 1) вычислить оценку  $[x^*]$
- 2) По этой оценке рассчитать значения индексов Робинсона, Старра, Кердо, то есть  $\hat{y}$  и выбрать вид и форму воздействия  $z = q(\hat{y}, d1, d2, d3)$ , где коэффициент  $d_i$  получаются также в процессе обучения **для каждого пациента отдельно**

Are there some questions that computer could never answer for us,  
however beautifully made it might be?

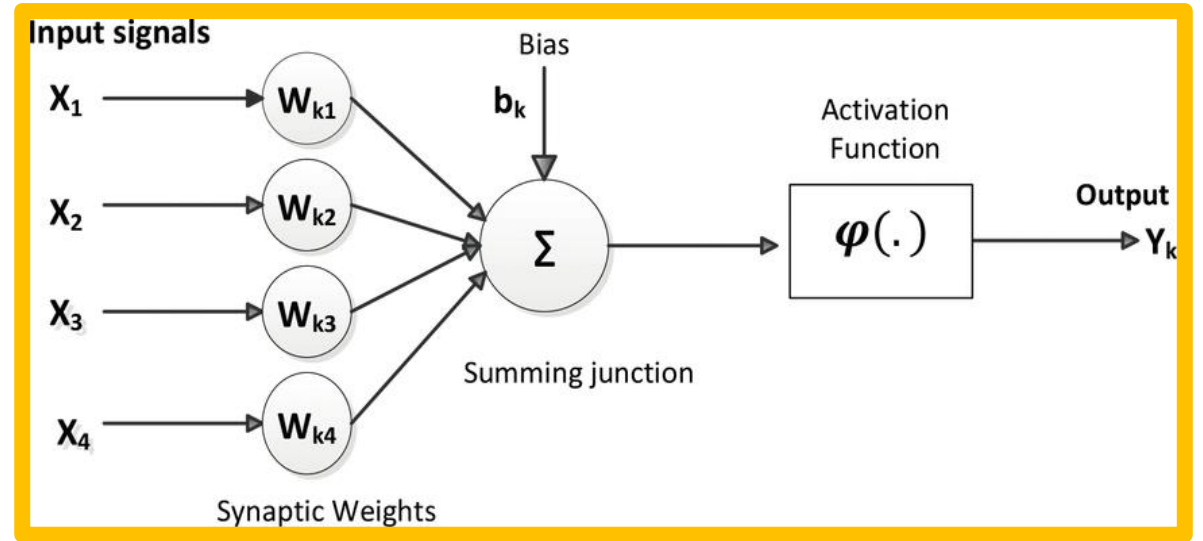
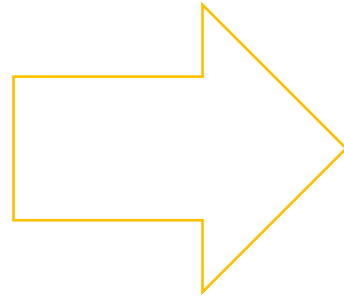
Ричард Фейнман



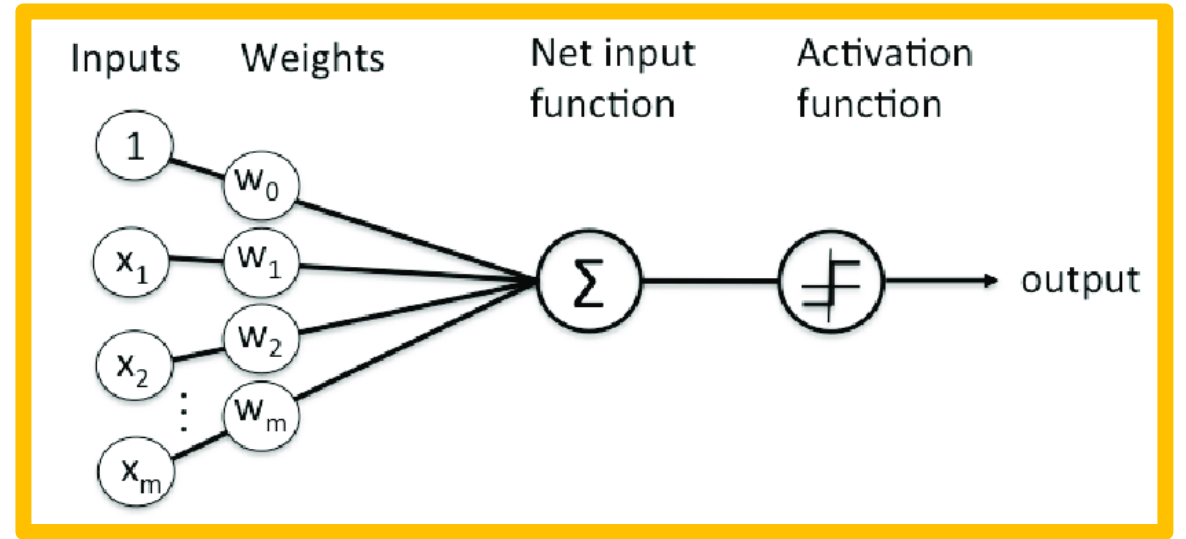
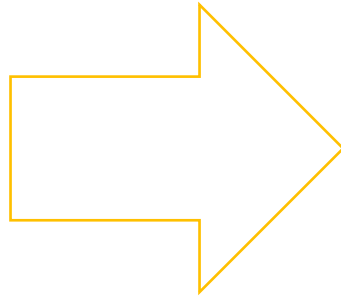
Что современный компьютер не может вычислить в принципе и  
почему ?



Уоррен Мак-Каллок  
(1898 —1969)

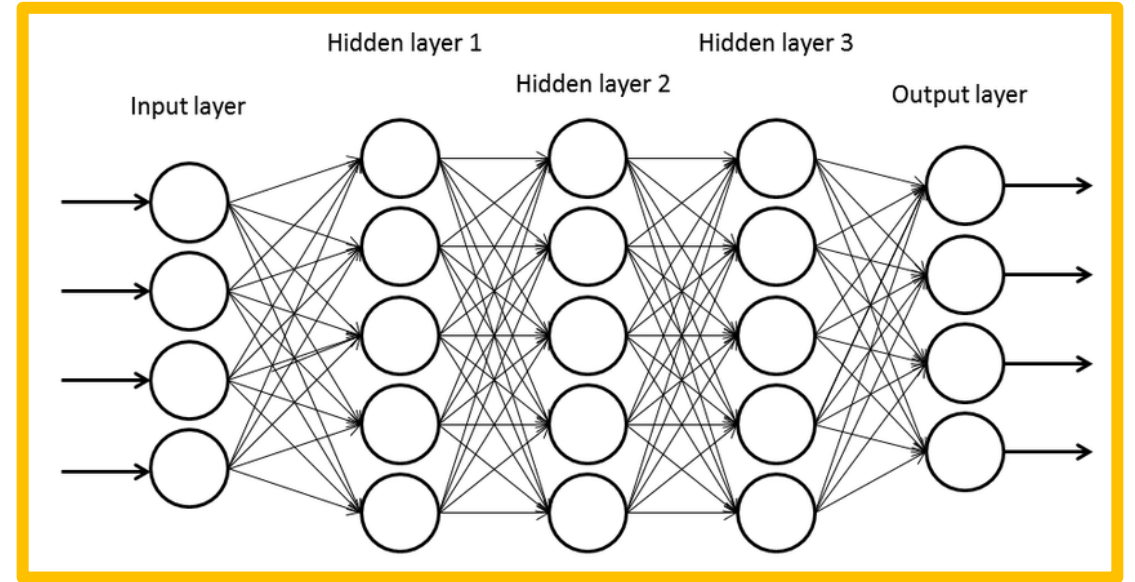
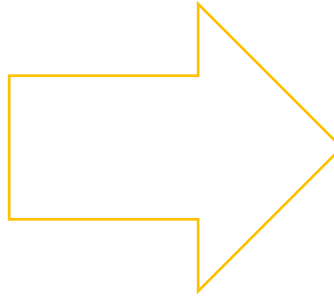
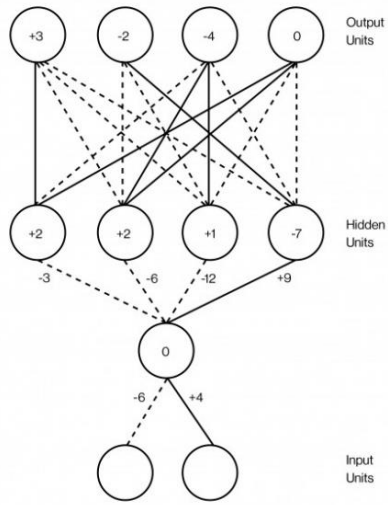


"Nervous Activity" (1943)  
(Логическое исчисление идей, имманентных нервной деятельности)



«понять фундаментальные законы обработки информации, включая как машины, так и человеческий разум».

Ф. Розенблатт читал курс лекций, который назывался «Теория механизмов мозга» а в 1962 году на основе материалов курса он опубликовал книгу «Принципы нейродинамики: Перцептроны и теория механизмов мозга»

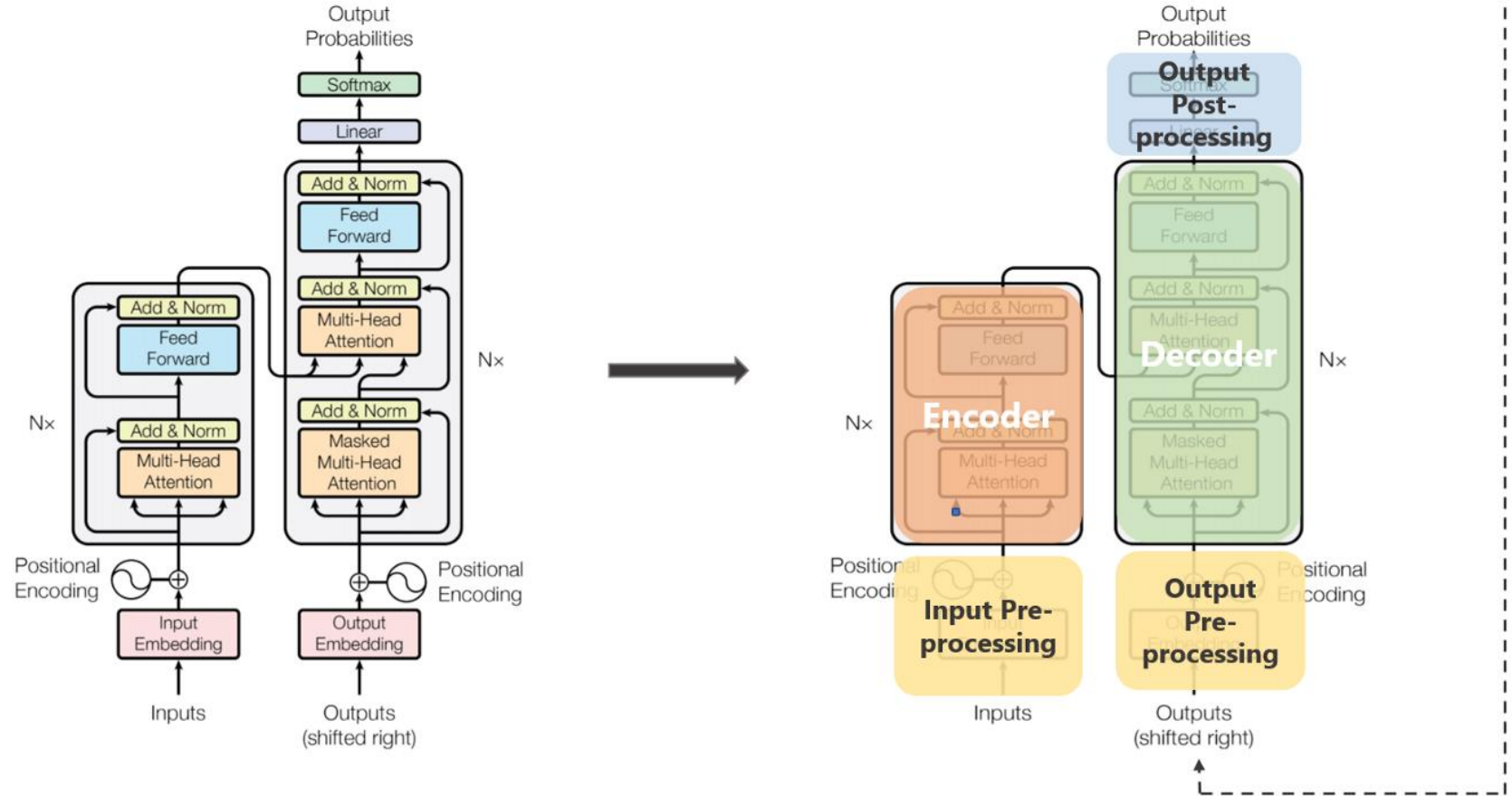


Джеффри Хинтон (1947):

Глубокое обучение может многое, но .... я думаю, что должно быть еще много концептуальных прорывов



[Ашиш Шарма](#)



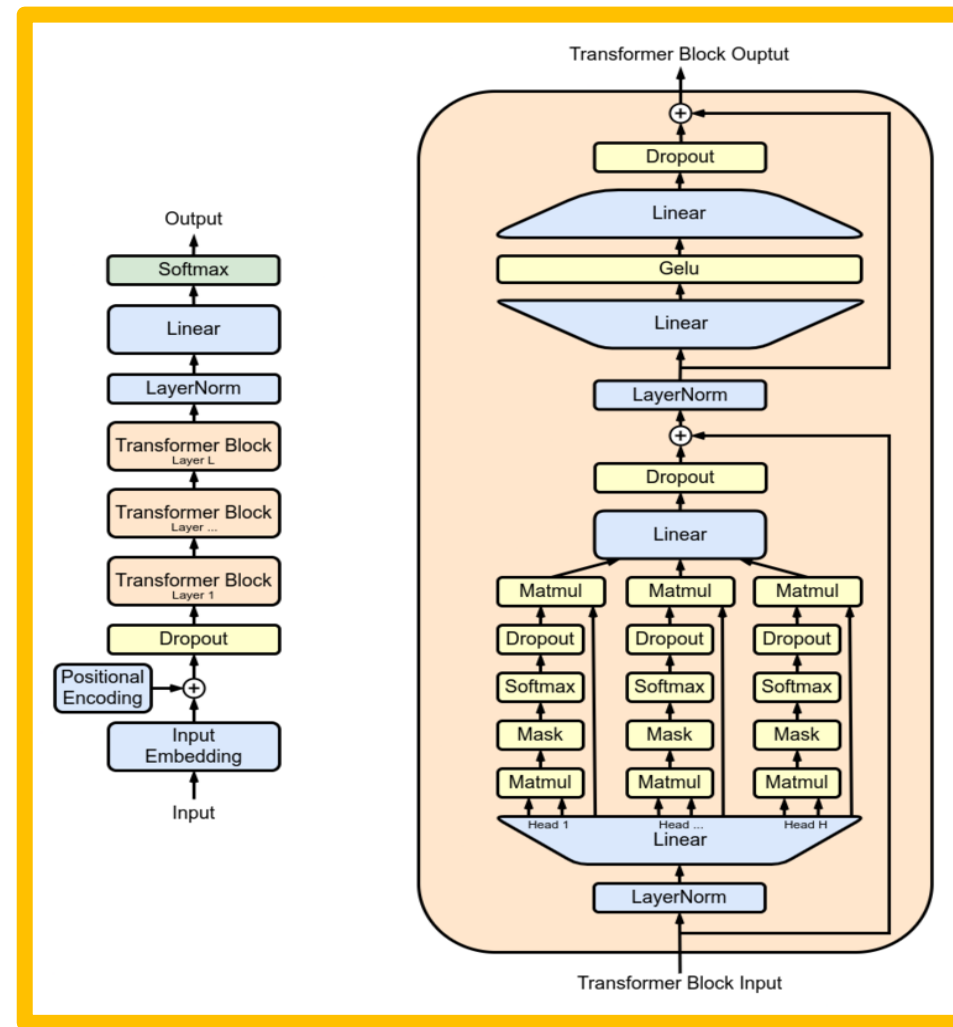
# Attention Is All You Need





Ilya Sutskever

nothing but digital brains  
inside large computer.



### Feedback (RLHF):

**Обучение программированию:** поиск багов в коде и пояснений по работе кода на человеческом языке. Для этого реальных разработчиков просили описывать словами, как они подходят к задаче, а в случае бага, его не просто «фиксили», а описывали словами, что не так и как это надо исправить.

## Основы современных КН могут и должны быть модифицированы

классические подходы к организации программно-управляемых вычислений, известные как принципы фон Неймана, могут быть модифицированы, чтобы наделить компьютеры способностями к индуктивным выводам, а именно:

- **принцип однородности памяти** –
  - **трансформируется** в принцип организации вычислений в нейроморфном поле памяти, где хранятся ранее приобретенные ассоциативные знания,
- **принцип адресности**
  - **дополняется** принципом гиперконвергентности и ассоциативной маршрутизации,
- **принцип программного управления**
  - **расширяется** за счет возможности изменения порядка выполнения команд на основе результатов анализа предшествующих вычислений,
- **принцип двоичного кодирования**
  - **дополняется** кодированием категориальных признаков с использованием процедуры, которая представляет собой преобразование дескрипторов признаков в численное представление по заданным правилам.

## Варианты пути развития

- **Имеем:** **Сейчас** «машинное обучение» – синоним извлечение имплицитных знаний (неявных, скрытых, латентных, неcodифицированных) из «больших данных».
- Без заранее размеченных данных современные алгоритмы машинного обучения не способны **извлечь знания из данных**, которые затем можно было бы перенести на **новые данные** (знания)
- **Вопрос:** как получить от СК **максимум возможностей из минимума данных**, то есть выявить суть явления или процесса из наблюдений и априорных знаний?
- **Ответ:** нужно **встроить в СК механизм самовнимания**, чтобы ... эффективно
  - использовать и сохранять в памяти всю имеющуюся информацию,
  - выявлять релевантные и контекстные связи между данными,
  - строить гипотезы и обобщать полученные данные, чтобы **оценивать вероятности** соответствия выбранных моделей вычислений и результатов экспериментальных наблюдений, извлекая из «сырых» данных **объяснительные абстракции**, которые можно переносить на другие ситуации .....
- **задача «умного» программирования** **принудительное «обучение» компьютера** **находить «наилучшее возможное».**

# Обучение как программирование, а научение как самоприменимость машины Тьюринга

- Наблюдаемая реальность включает : 1) уже состоявшейся (прошлое), 2) текущее-настоящее и 3) потенциально возможное (будущее), в котором то может **воплотиться процесс «обучения»**. Время в мире, где «правит» информационное взаимодействие», – трехмерно  $T^3$ 
  - *Различие между прошлым, настоящим и будущем – лишь необычайно устойчивая иллюзия.*

А. Эйнштейн.

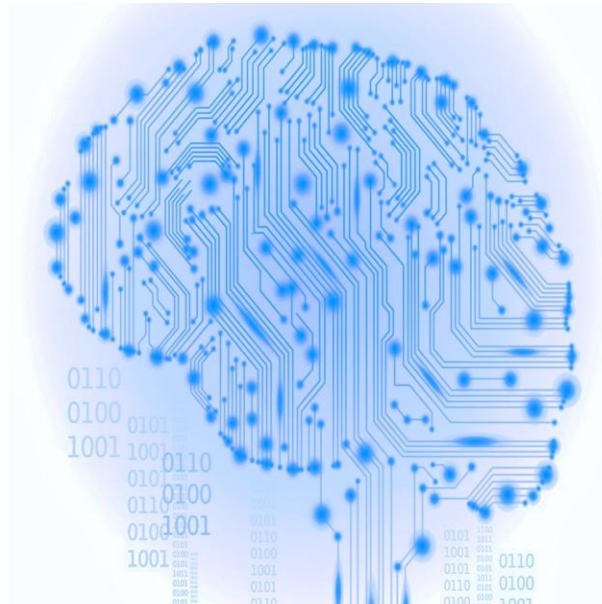
- Мышление и сознание «самоприменимы» и являются объективным феноменом реальности, который может проявляться в случае, когда «вещество» находится (переводится) **в особом фазовом состоянии** – то есть способно накапливать и обрабатывать информацию с использованием «вычислительных технологий» (процессов обработки символьных потоков).

[Насколько ВИРТУАЛЕН наш мир? - YouTube](#)

## Часть 2 как модифицировать супер-вычислитель

### Человеческий мозг—самоприменимая сложная адаптивная система

По аналогии с мозгом—самоприменимой адаптивной системы пополнить архитектуру «машины Тьюринга» процессами нейроморфных вычислений. Частью нейроморфных вычислений являются спайковые нейронные сети, позволяющие преодолеть ограничения нейронных вычислений и эффективно использовать алгоритмы машинного обучения в реальных приложениях.



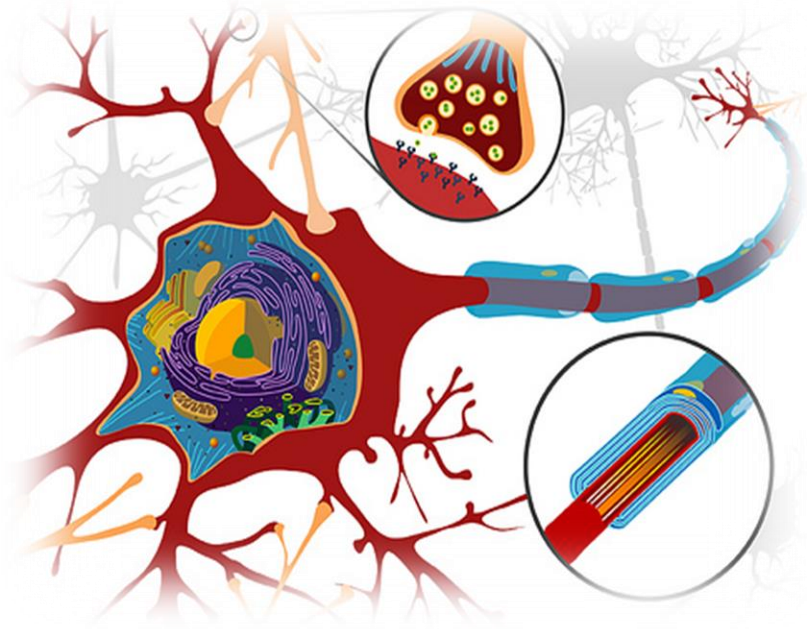
*Spiking neural network*, SNN) — третье поколение искусственных нейронных сетей (ИНС), которое отличается от бинарных (первое поколение) и частотных/скоростных (второе поколение) ИНС тем, что в нем нейроны обмениваются короткими (у биологических нейронов — около 1—2 мс) импульсами одинаковой амплитуды (у биологических нейронов — около 100 мВ). Является самой реалистичной, с точки зрения физиологии, моделью ИНС

# Специфические свойства биологической памяти по сравнению с компьютерной



- ❖ **Нерепрезентативность** - она не является точным отражением событий внешнего мира.
- ❖ **Реконструктивность** - ее воспроизведение является активным процессом самосборки нейронной системы.
- ❖ **Нерепликативность** - каждое ее следующее воспроизведение отличается от предыдущего, вовлекая перекрывающуюся, но отличающуюся популяцию нейронов и синапсов.
- ❖ **Рекатегориальность** - каждая ее новая реконструкция при воспроизведении проходит оценку идентичности на весах других, связанных с ней систем.
- ❖ **Реконсолидируемость** - каждая новая реконструкция подвергается запоминанию, сходному по своим механизмам с процессами исходного запоминания.

# Специфические свойства биологической памяти по сравнению с компьютерной



- ❖ **вырожденность** - одно и то же событие хранится в виде множественных неидентичных копий функциональной системы,
- ❖ **автоассоциативность** - разные копии одной и той же функциональной системы имеют связи с разнообразными другими системами за счет вырожденности набора входящих в эти копии нейронов,
- ❖ **реинтегративность** – целая система может быть извлечена из памяти по возбуждению небольшой части ее элементов,
- ❖ **репаративность** – система может восстанавливаться при повреждении части из ее элементов или даже части из ее копий.

# Выводы

В настоящее время компьютеры и системы на базе ИНС не реализуют все известные особенности функционирования мозга. Современные ИНС построены на **выявлении корреляций между входными данными** при их фиксированном распределении и соответствующих состояний нейронов. Но эти корреляции не отражают причинно-следственную связь (**супервентность**) между паттернами данных и состоянием ИНС.

Сформированные на основе корреляций объяснения не выявляют причин, которые вызывает наблюдаемые на «механистическом уровне» процессы, что может привести к неправильным обобщениям и искаженному пониманию происходящего. Предсказать редкое или нетипичное поведение модели возможно, но для этого **понадобится объединение корреляционных, информационных и механистических (физических) моделей.**

Почему же мозг – супер вычислитель, а современный суперкомпьютер не цифровой мозг? Это потому, что «Машина Тьюринга» как формальная алгоритмическая система согласно теоремам Геделя - не самоприменима»



Спасибо за внимание!

