

Нейронаука и нейросети

Кусочно-непрерывное введение

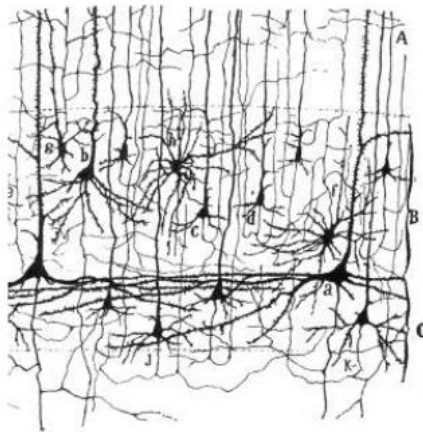
2021

Базовые элементы

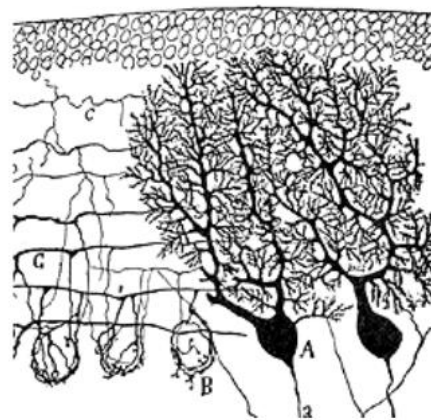
Нейронная доктрина

- Нейрон – фундаментальный структурный объект мозга
- Нейроны – дискретные клетки
- Информация передаётся от дендритов к аксону через тело клетки

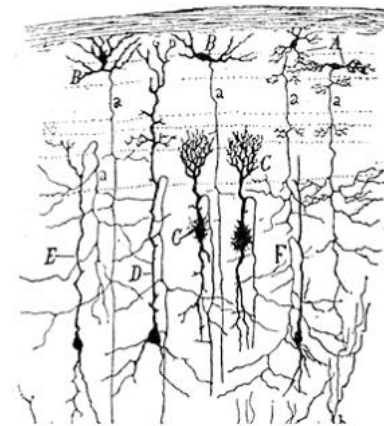
The Neuronal Zoo



Visual Cortex



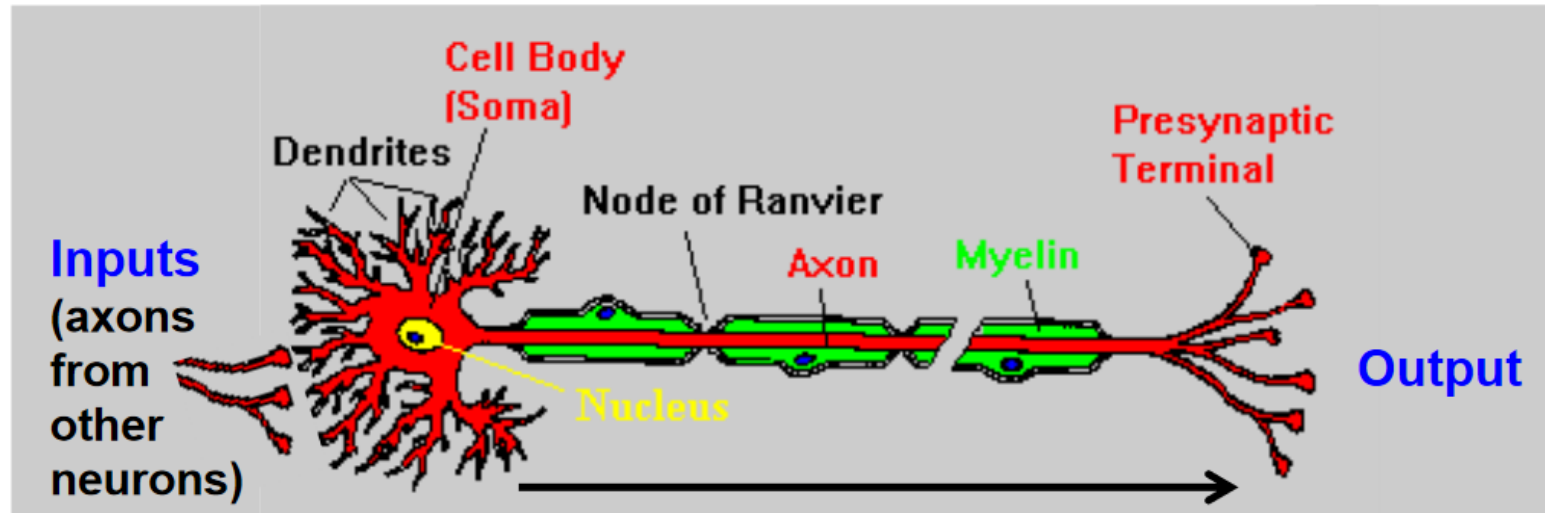
Cerebellum



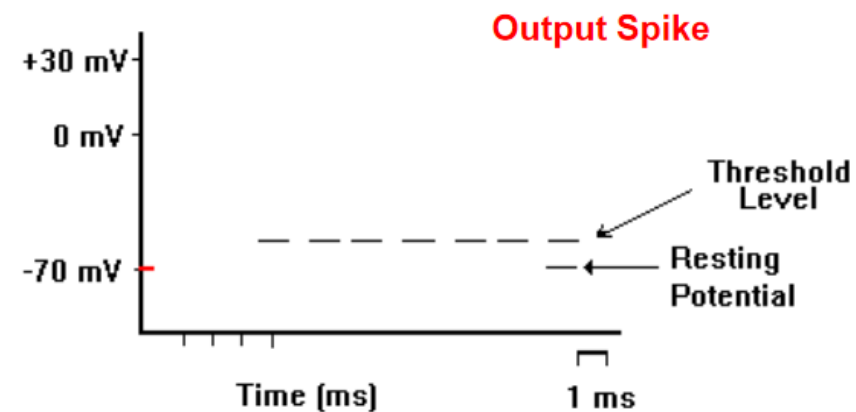
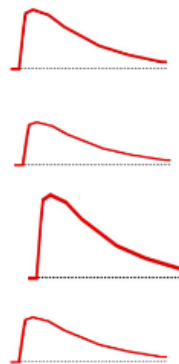
Optic Tectum

(Drawings by Ramón y Cajal, c. 1900)

Модель нейрона

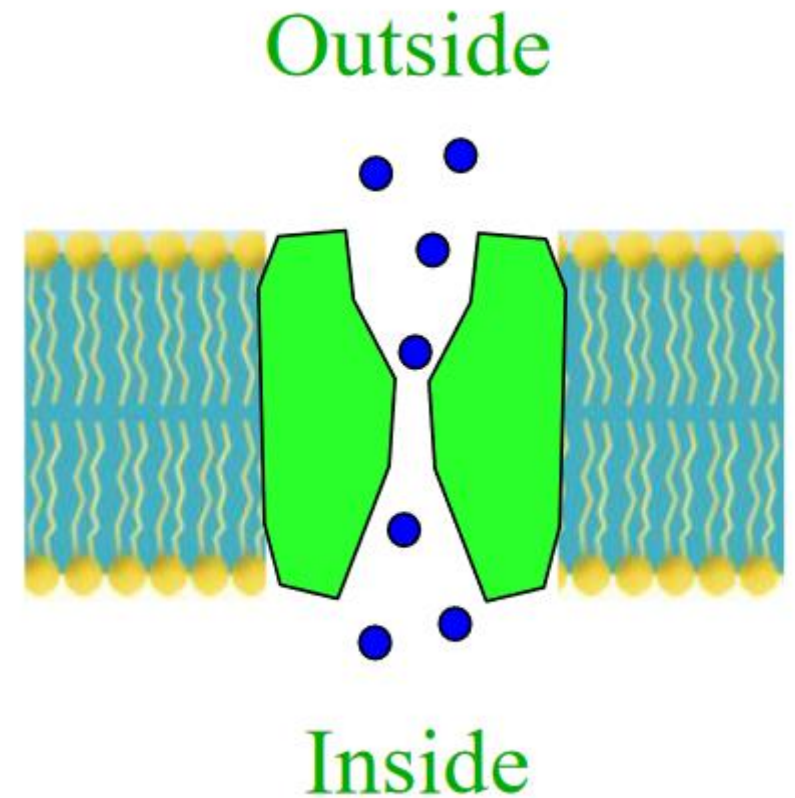


EPSP =
Excitatory
Post-Synaptic
Potential



Изменение потенциала нейрона

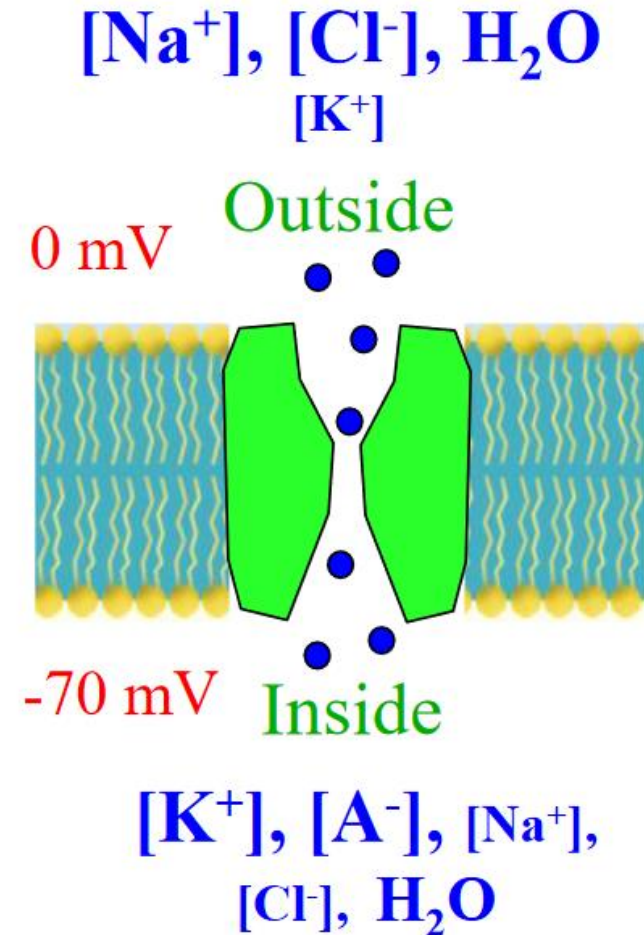
- Нейрон окружён мембраной (двойной липидный слой)
- В мембране существуют ионные каналы, которые при определённых условиях пропускают определённые ионы, например Na^+ , Cl^- , K^+
- Вне каналов свободный проход ионов невозможен



Изменение потенциала нейрона

В состоянии покоя нейрон имеет отличный от окружающей среды потенциал

Ионные насосы (Ionic pump) создают отрицательный потенциал -70 mV выпуская Na^+ и впуская K^+



Ионные каналы

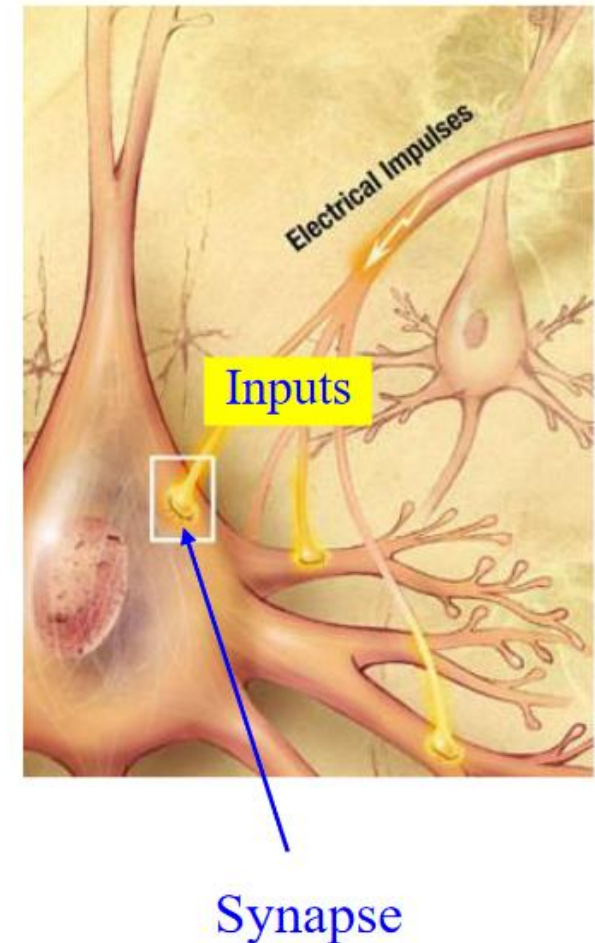
Ионные каналы – протеины в мембранах, пропускающие только определённые ионы

Ионные каналы могут открываться и закрываться

- По напряжению (вероятность открытия определяется потенциалом мембраны)
- По химическому взаимодействию (взаимодействие с хим. веществом открывает канал)
- По механическому воздействию (растяжение или давление открывает канал)

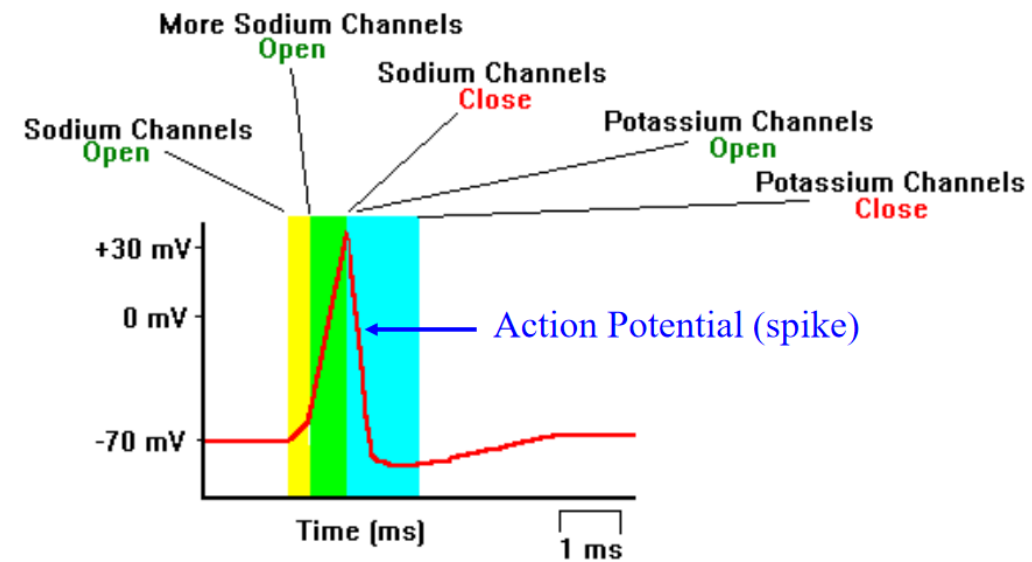
Открытие ионных каналов

- Получение сигнала от других нейронов на химические каналы
- Открытие химических каналов
- Изменение потенциала мембраны
- Заккрытие\открытие каналов по напряжению в дендритах, теле нейрона, аксоне, вызывающие деполяризацию (увеличение напряжения) или гиперполяризацию (уменьшение напряжения)
- Сильная поляризация вызывает срабатывание нейрона (пик или потенциал действия)



Потенциал действия

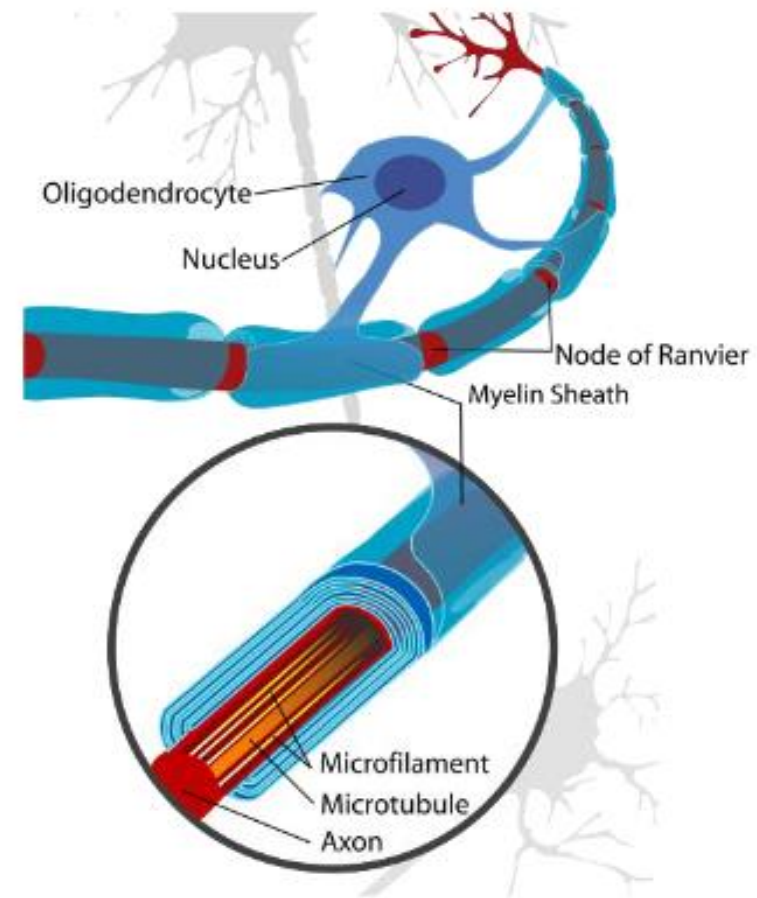
- Каналы с активацией по напряжению вызывают потенциал действия (action potential)
- Достаточно сильная деполяризация вызывает открытие натриевых каналов создавая большой приток натрия, что увеличивает деполяризацию и ведёт к открытию ещё большего числа каналов
- Открытие каналов калия восстанавливает потенциал мембраны



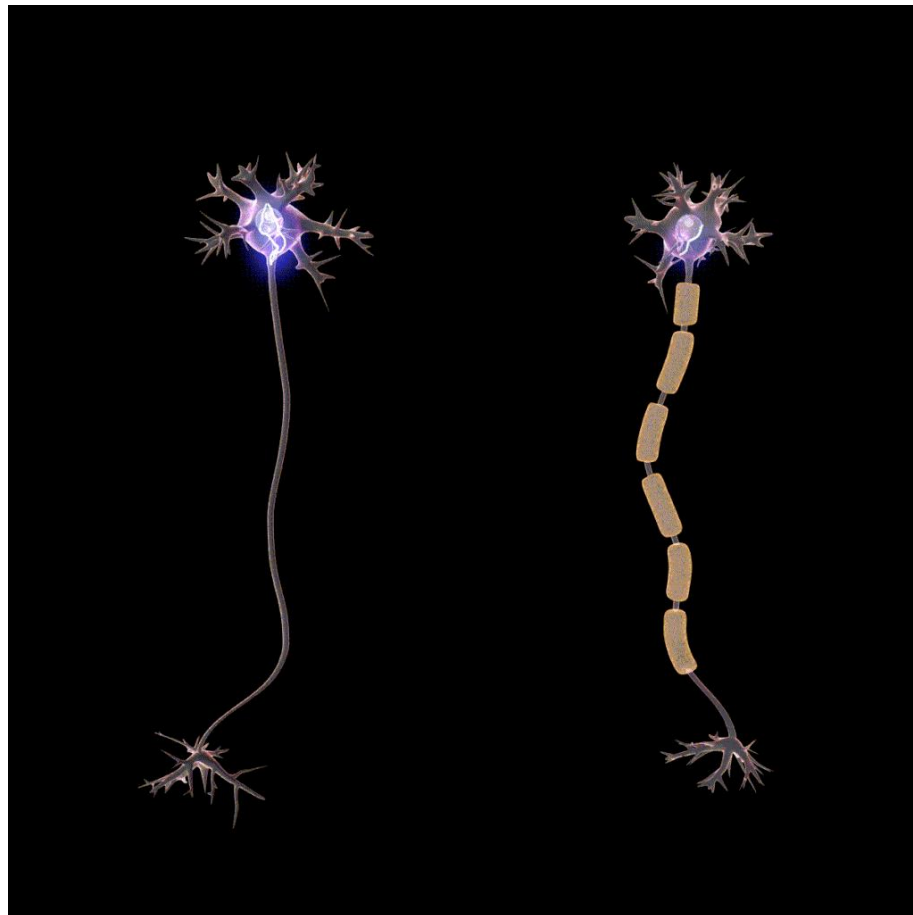
Распространение потенциала действия

Миелин покрывает аксон нейрона кусочно (кроме перехватов Ранвье). За покрытие отвечают олигодендроциты (связывают до 30 нейронов).

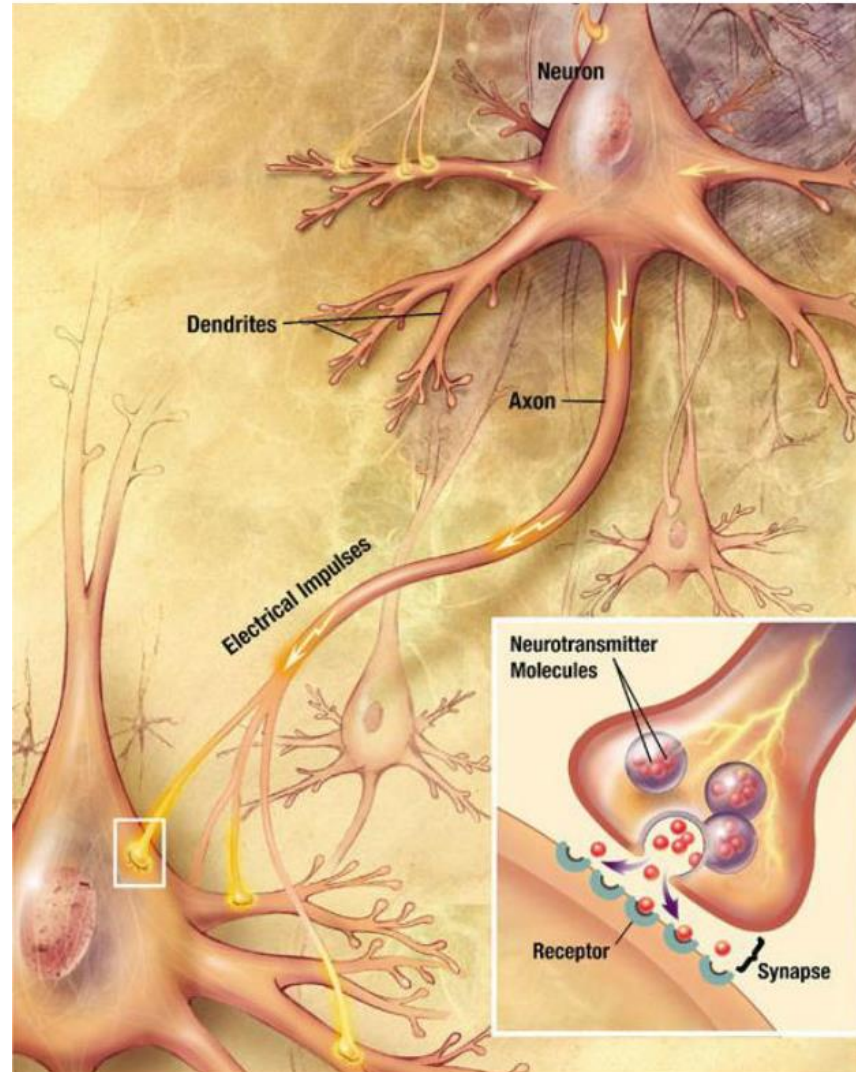
Перехваты Ранвье состоят из чувствительных ионных каналов, которые позволяют передавать сигнал вдоль нейрона с меньшими потерями (сальдаторное (т.е. скачкообразное) проведение).



Сальдаторное (т.е. скачкообразное) проведение



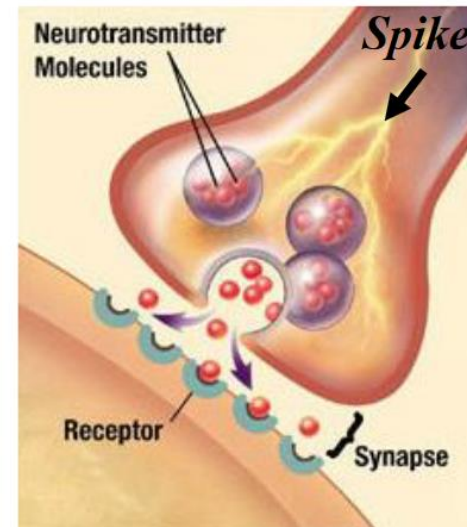
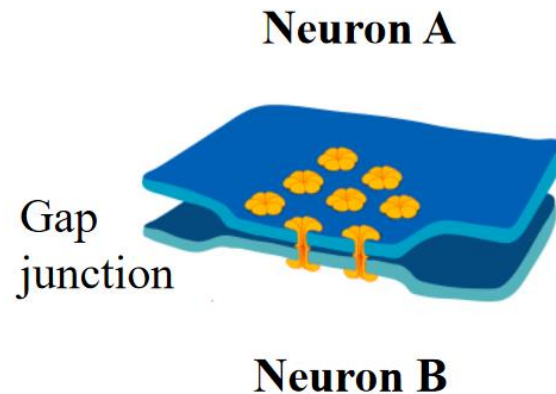
Достижение потенциала действия конца аксона



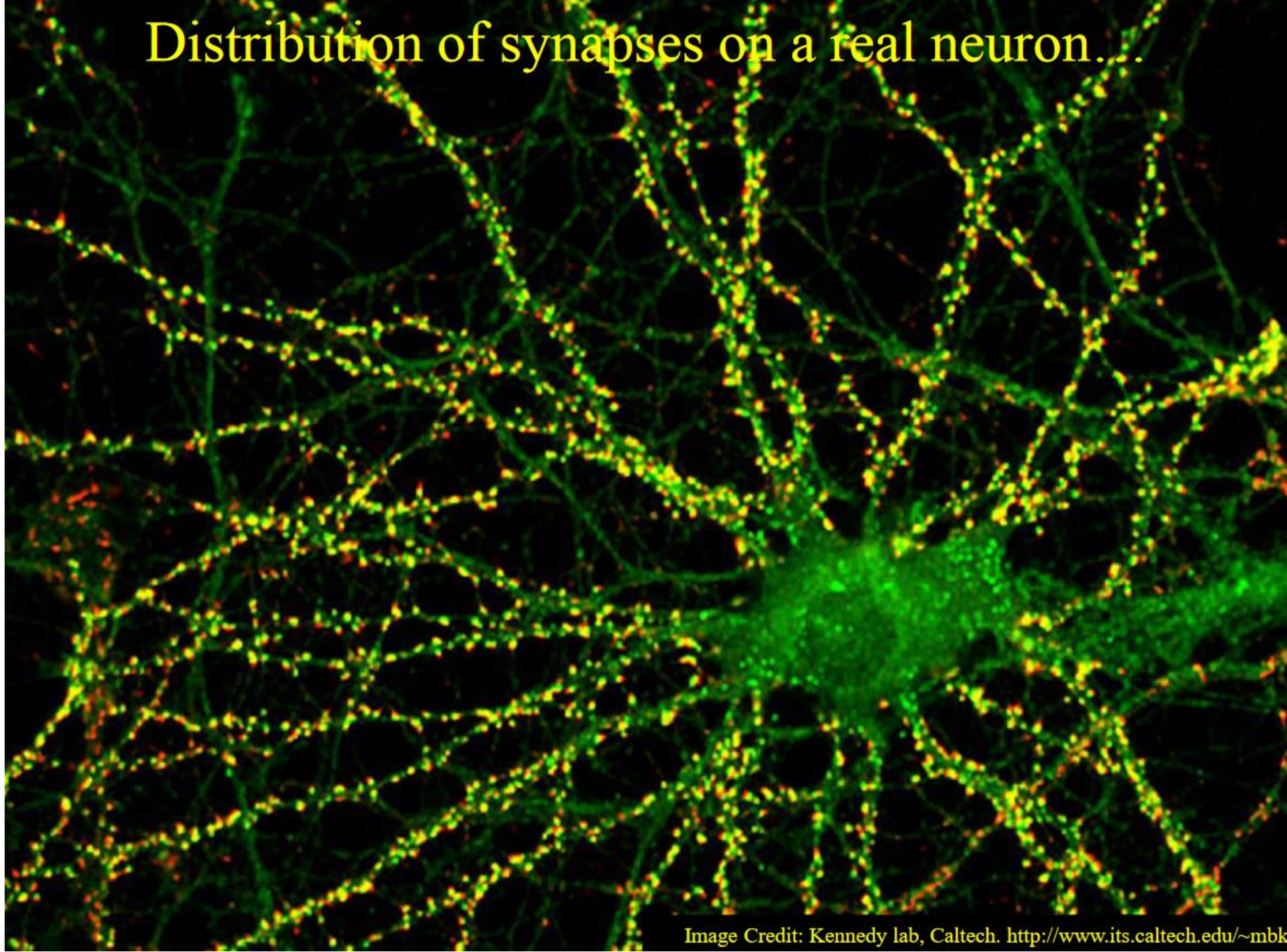
Синапс

Синапс – соединение между двумя нейронами

- Электрические синапсы используют щелевые контакты
- Химические синапсы используют нейротрансметтеры
- Синапсы могут увеличивать (возбуждающие) или уменьшать (тормозные) потенциал мембраны

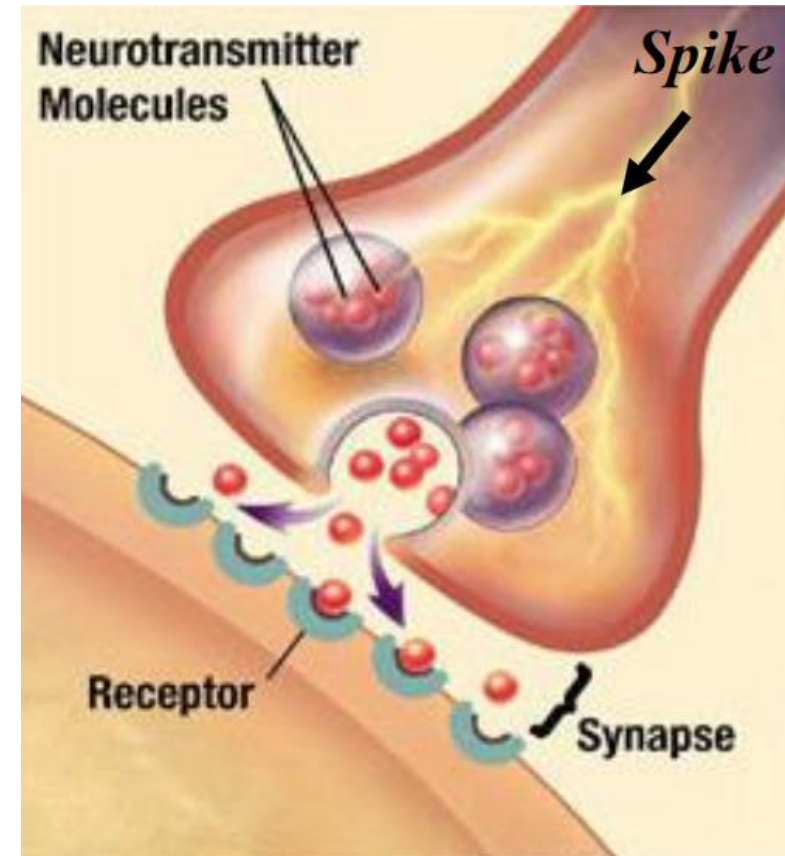


Distribution of synapses on a real neuron...



Возбуждающий синапс

- Приход пика
- Выпуск нейротрансммитера
- Нейротрансммитер взаимодействует с рецепторами ионных каналов
- Открытие ионных каналов
- Проход натрия через каналы в нейрон
- Деполяризация мембраны

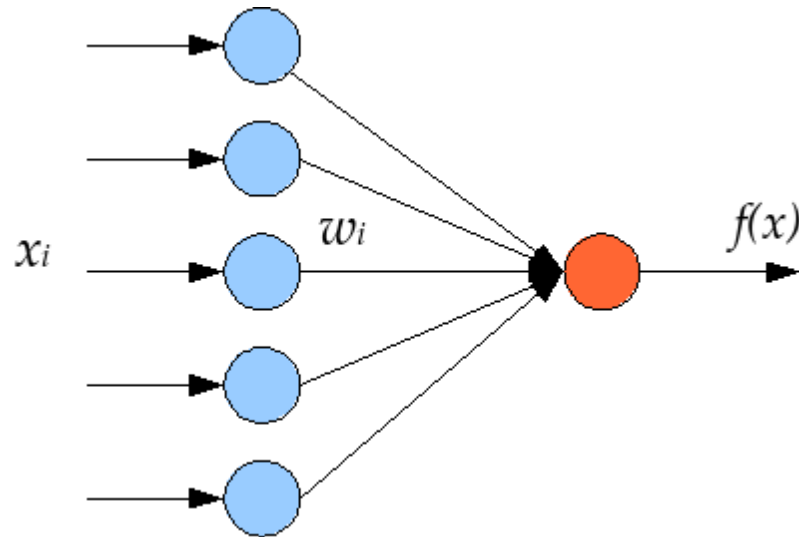


Нейронные сети

Основной базовый элемент – нейрон

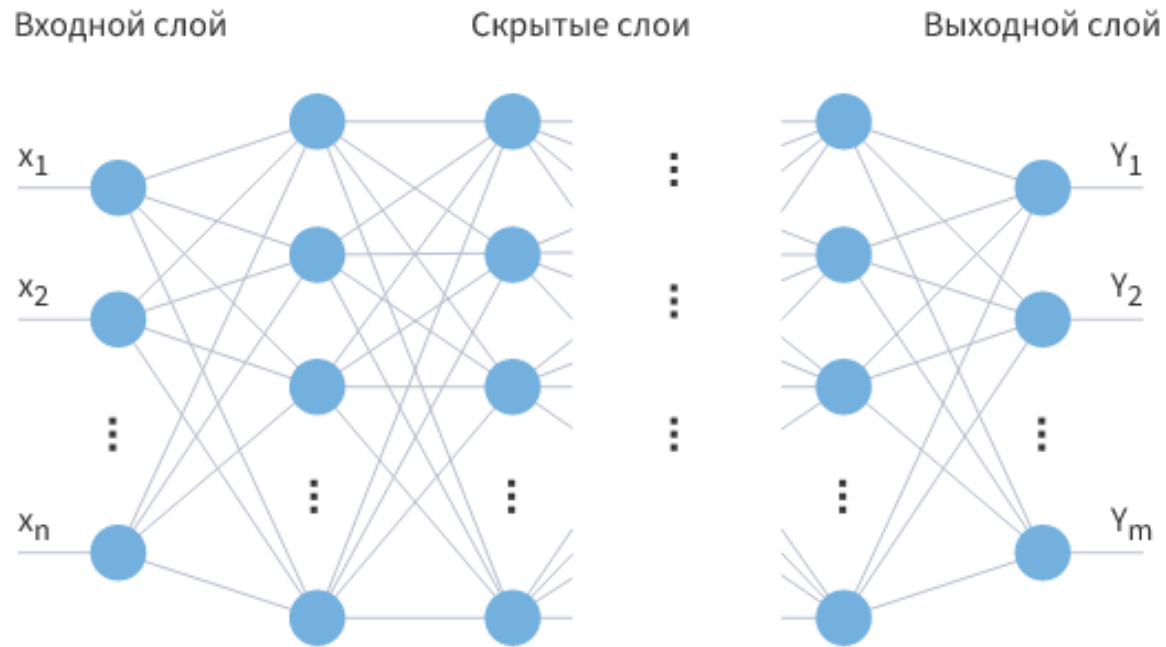
Математическая операция – взвешенное сложение входов с последующим применением нелинейной функции активации

$$y = f(\sum x_i w_i)$$



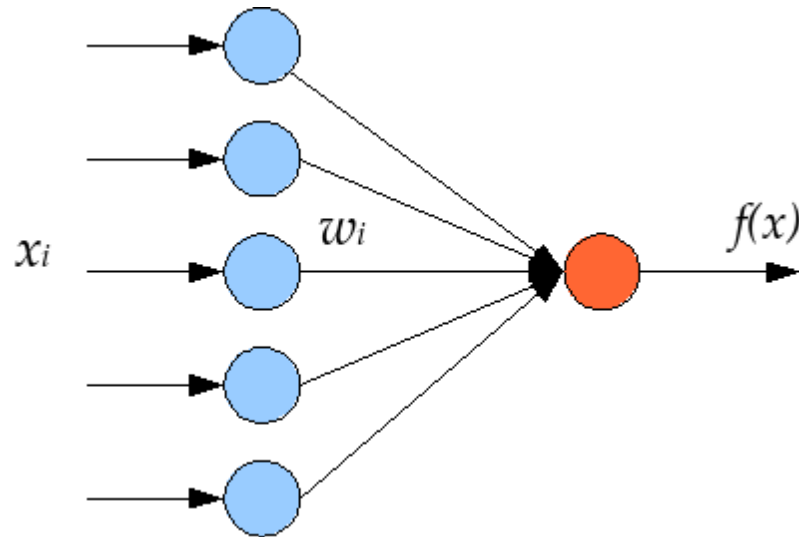
Нейронные сети

Комбинация нескольких слоёв параллельных нейронов даёт нейронную сеть



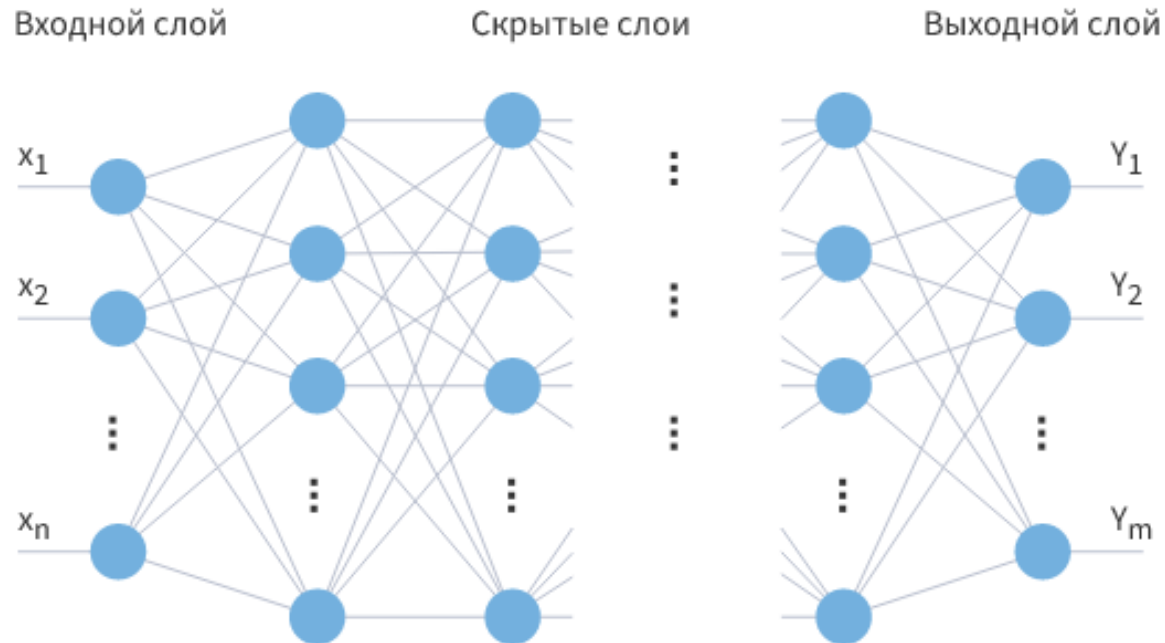
Кодирование информации в нейронных сетях

Информация в сетях кодируется нормализованным значением y (от 0 до 1). Веса, как правило, тоже нормализованы.



Функционирование нейронных сетей

Нейронные сети выполняют вычисления синхронно (каждый слой вычисляется только после получения значений всех своих входов).



Функция активация

Нелинейная функция (иначе сможем вычислять только линейные функции, ибо любая линейная комбинация линейных функций – линейная функция).

Простейший вариант – пороговая функция!

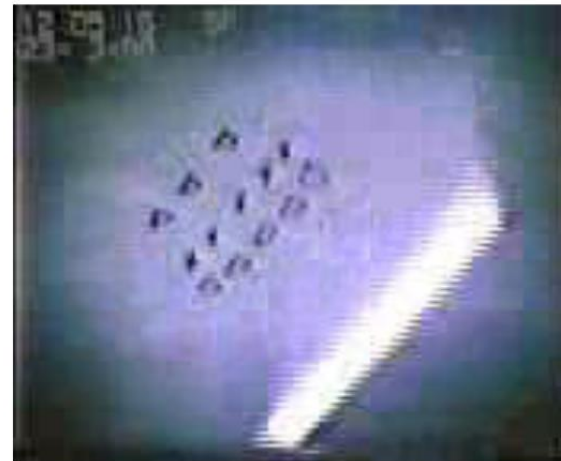
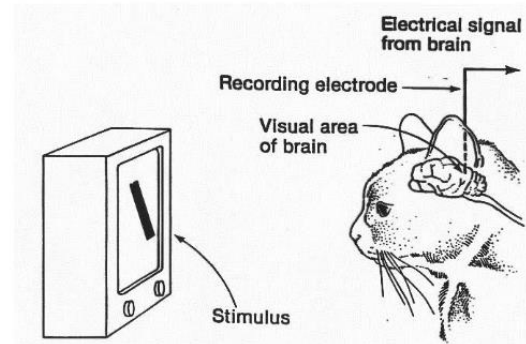
Полученный нейрон напоминает реальный (необходимо накопление определённых входов для срабатывания)

... но не используется. Почему – далее.



Восприятие зрительной информации и кодирование

Эксперимент – обездвигенное животное, в мозг которого вживлён электрод в V1 (visual primary cortex, затылочный отдел мозга, отвечающий за обработку визуальной информации), измеряющий напряжение; палочка света, которая перемещается по экрану, на которое смотрит животное. Фиксируются зоны, при изменении освещенности которых изменяется напряжение.

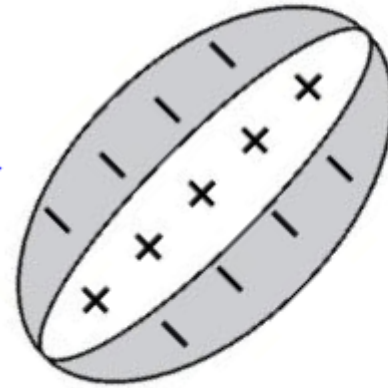
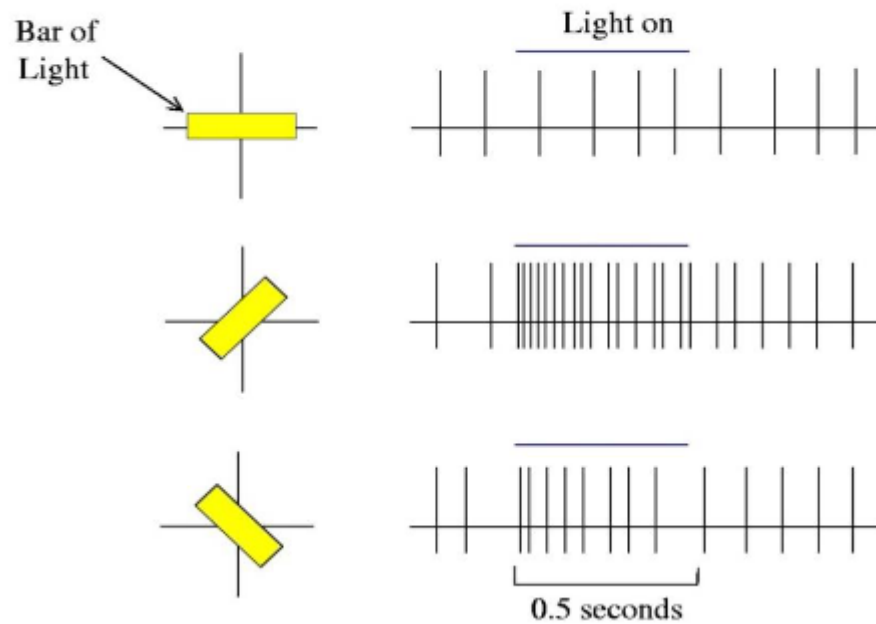


(Hubel and Wiesel, c. 1965)

Видео

- <https://www.youtube.com/watch?v=Cw5PKV9Rj3o>

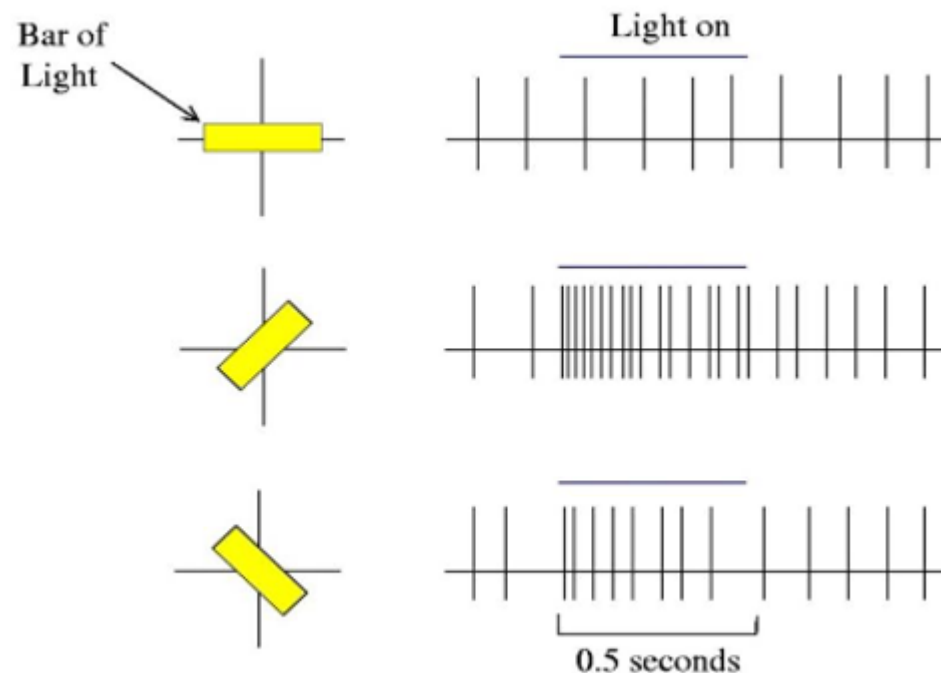
Orientation Preference



Oriented
receptive field
of a neuron in
primary visual
cortex (V1)

Кодирование нейрона

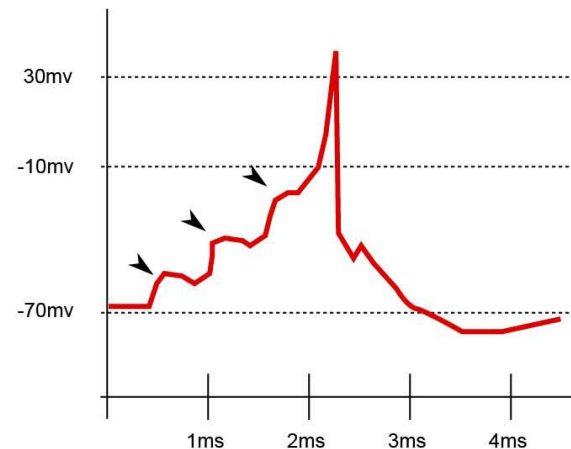
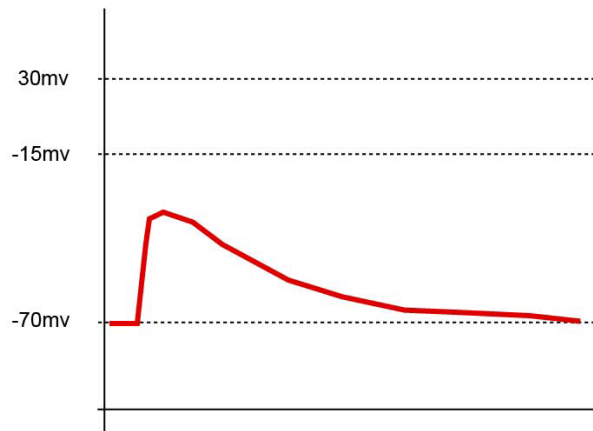
Информация при передачи между нейронами кодируется только частотно (не кодируется амплитудно). Т.е. имеет значение только частота пиков, но все пики равны по амплитуде.



Функционирование системы нейронов

Система нейронов функционирует асинхронно (т.е. в любой момент может принимать или не принимать сигналы от одного или многих нейронов). Срабатывание нейрона также может происходить в произвольный момент

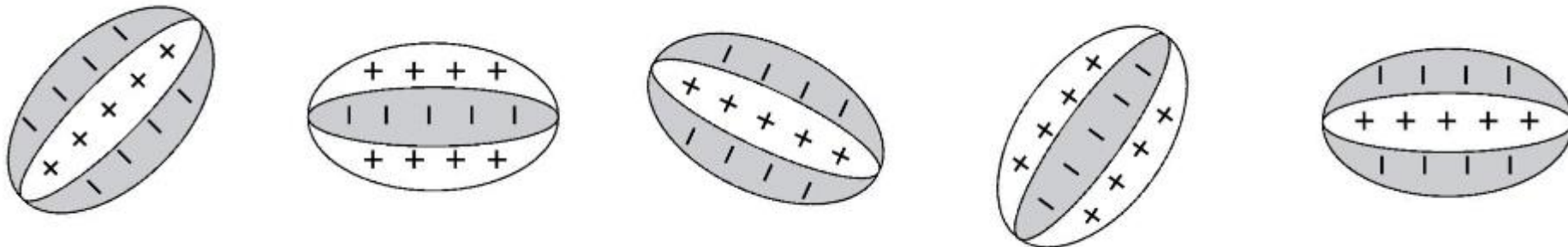
Аналогия – воздушный шарик с дырочкой. Надувая шарик недостаточно быстро – воздух будет выходить из шарика и он не лопнет. Но если надумать его вдывая воздух часто то рано или поздно он всё равно взорвётся (создаст потенциал действия).



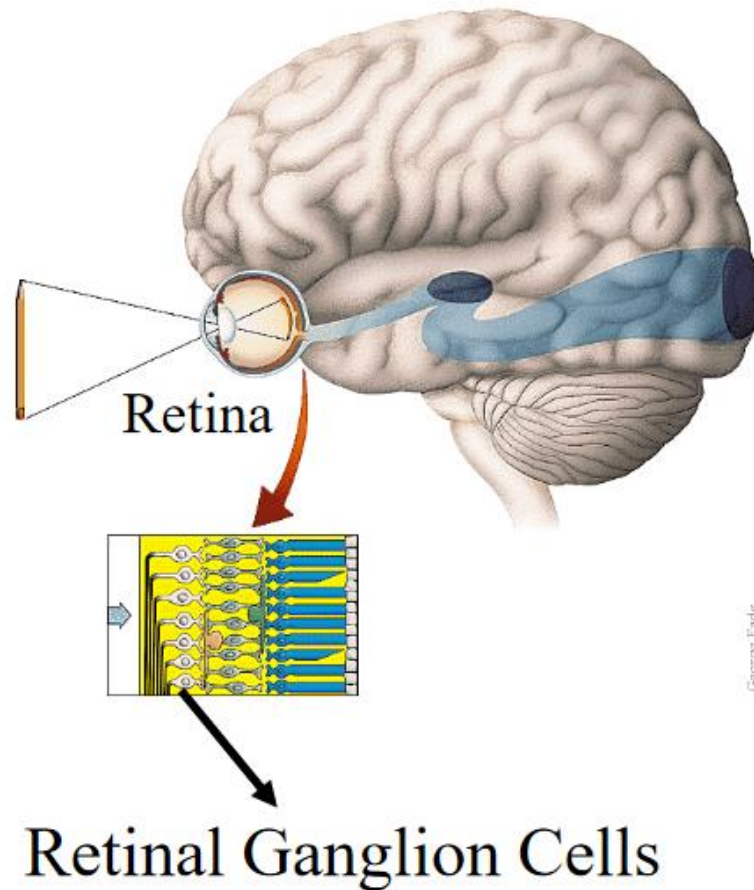
Рецептивное поле V1

РП - особый стимул (входной сигнал нейрона) генерирующий сильный ответ, или участок с рецепторами, которые при воздействии определённого стимула приводят к возбуждению.

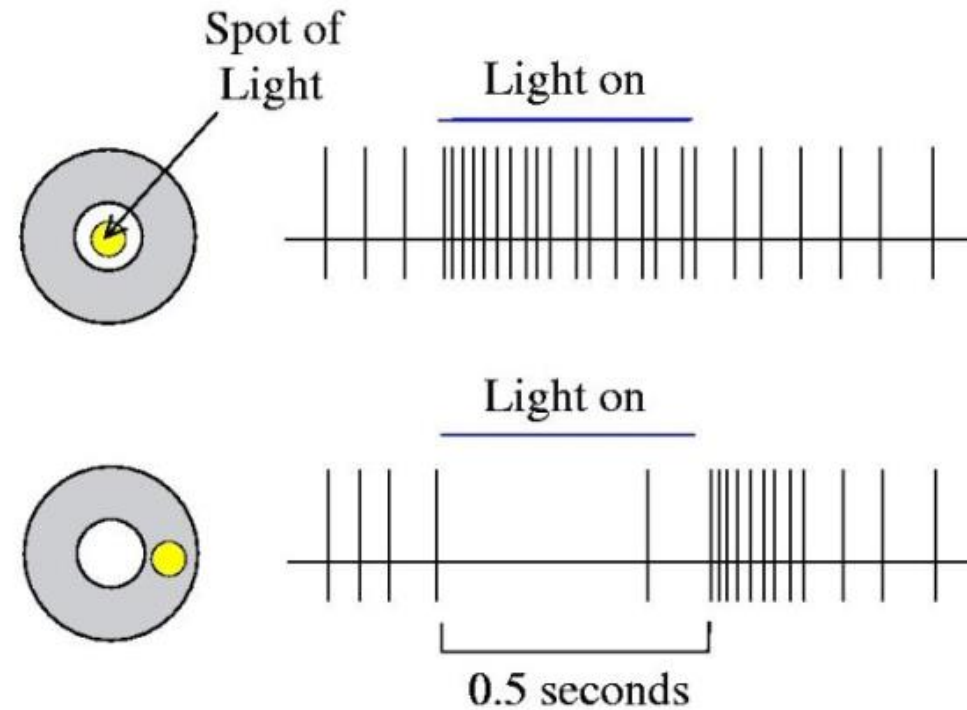
V1 содержит нейроны или группы нейронов, отвечающих за ориентированные рецептивные поля следующего вида



Рецептивное поле сетчатки



Receptive Fields in the Retina

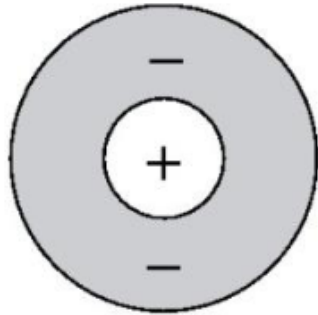


Видео

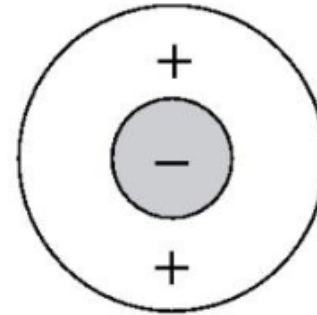
- <https://www.youtube.com/watch?v=jlevCFZixlg>

Рецептивное поле сетчатки

Center-Surround Receptive Fields in the Retina

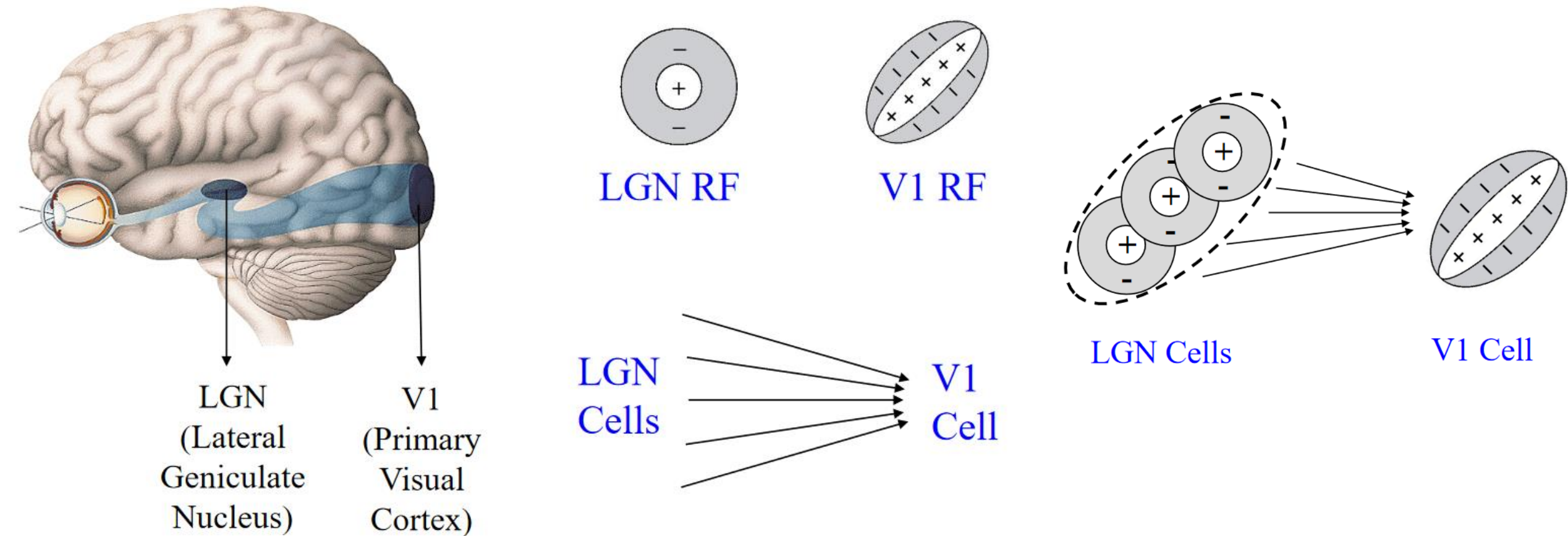


On-Center
Off-Surround
Receptive Field



Off-Center
On-Surround
Receptive Field

LGN (Латеральное коленчатое тело)

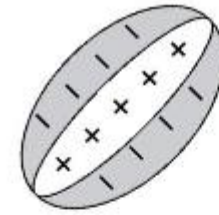


Форма рецептивных полей

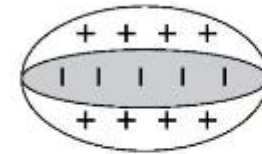
Почему рецептивные поля имеют следующие формы?

Гипотеза эффективного кодирования. Цель – различимость изображений. Имея изображение I мы можем «реконструировать» (воспринять) $I' = \sum RF_i r_i$ используя поля RF_i и их сигналы r_i .

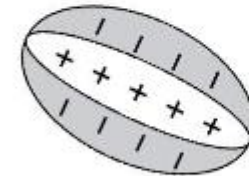
Основная идея – минимизация в ошибок между I и I' .



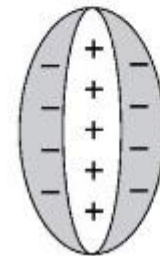
RF₁



RF₂



RF₃



RF₄

Форма рецептивных полей

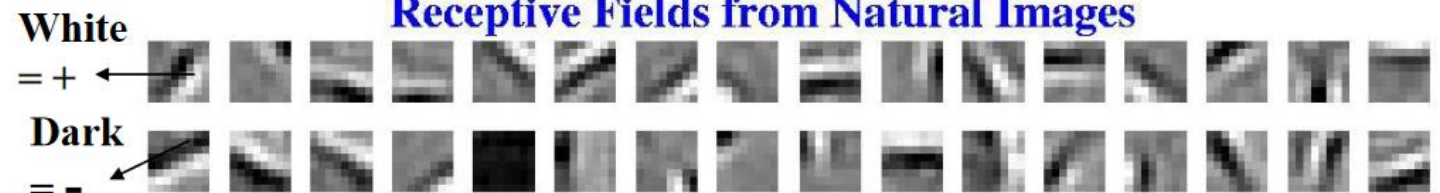
Моделирование.
Выбираем случайные
значения RF_i , реализуем
алгоритм эффективного
кодирования для
минимизации ошибки.
Смотрим на полученные
рецептивные поля.

Natural Images

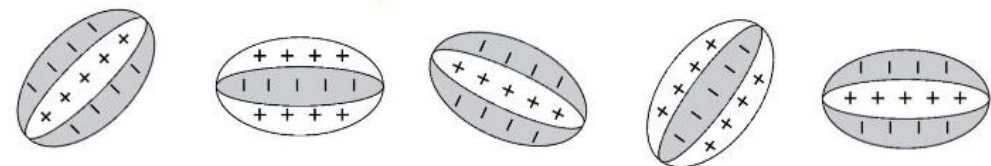


□ Receptive Field Size

Receptive Fields from Natural Images



Receptive Fields in V1



Sparse coding

ICA

Predictive coding

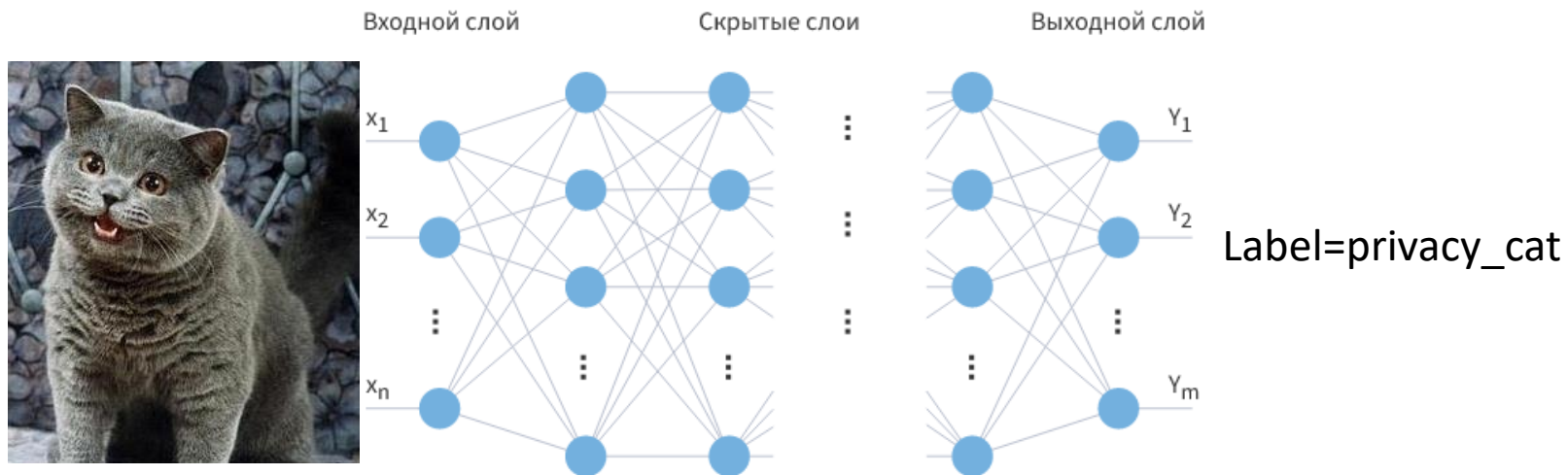
Распознавание границ изображения сетчаткой (аппроксимация)



Свёрточные нейронные сети

Задача – классификация изображений.

Подход «влоб» - интерпретация изображения как массива байт, подача его в нейронную сеть.

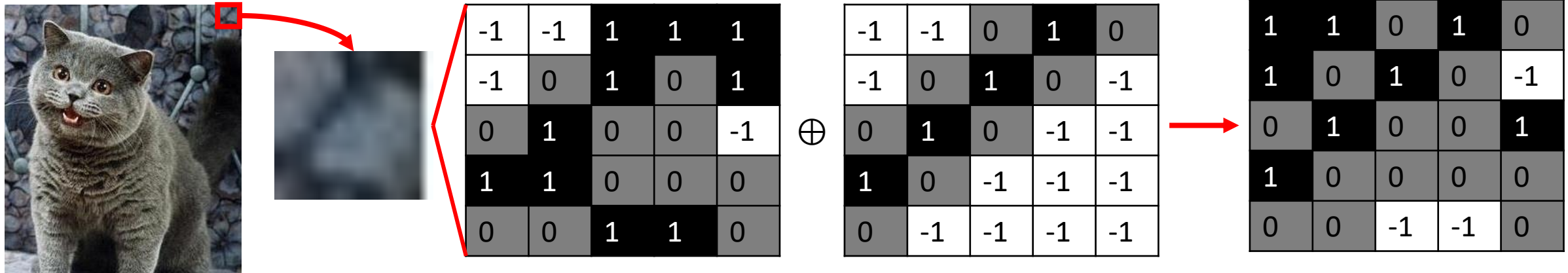


Проблема – требуется большая нейронная сеть, долго обучать.
Сети фактически необходимо «понять» идею картинок.

Свёрточные нейронные сети

Основная идея – использование свёрток (фильтров).

Фильтр – матрица, которая по координатно перемножается с входом фильтра, для получения выхода



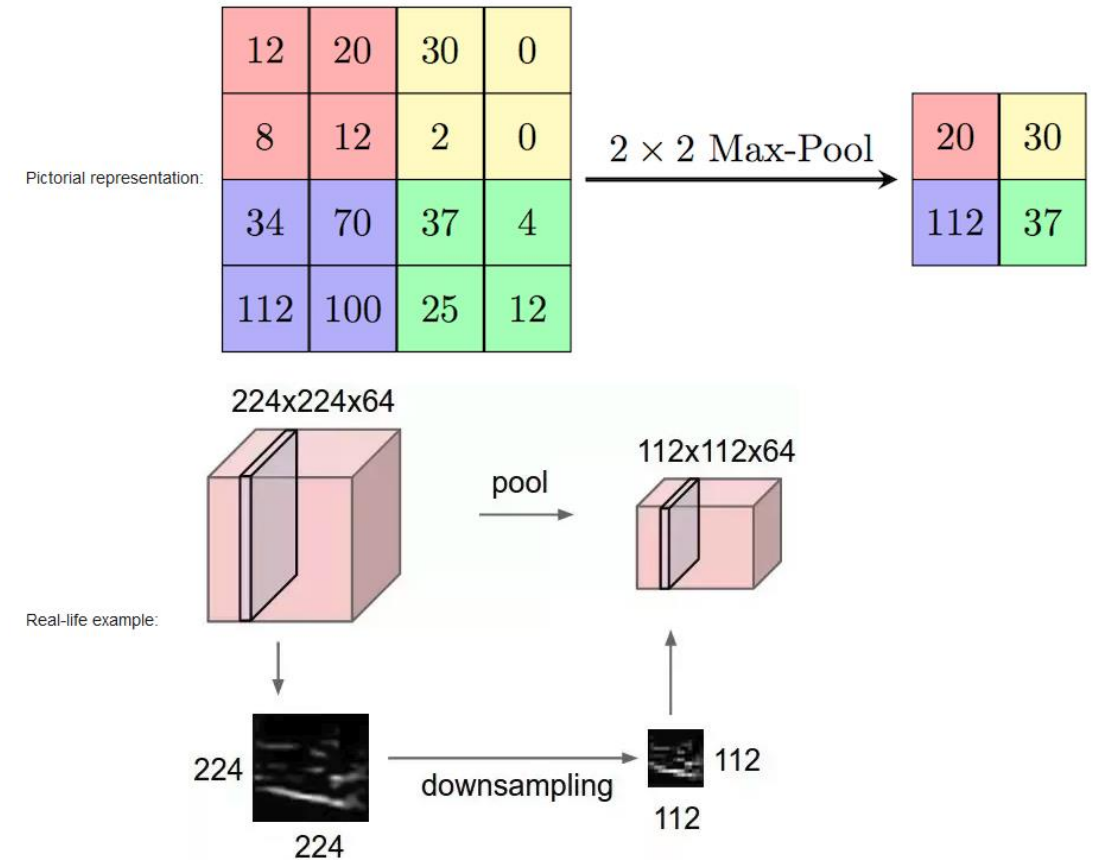
Видео

<https://www.youtube.com/watch?v=f0t-OCG79-U>

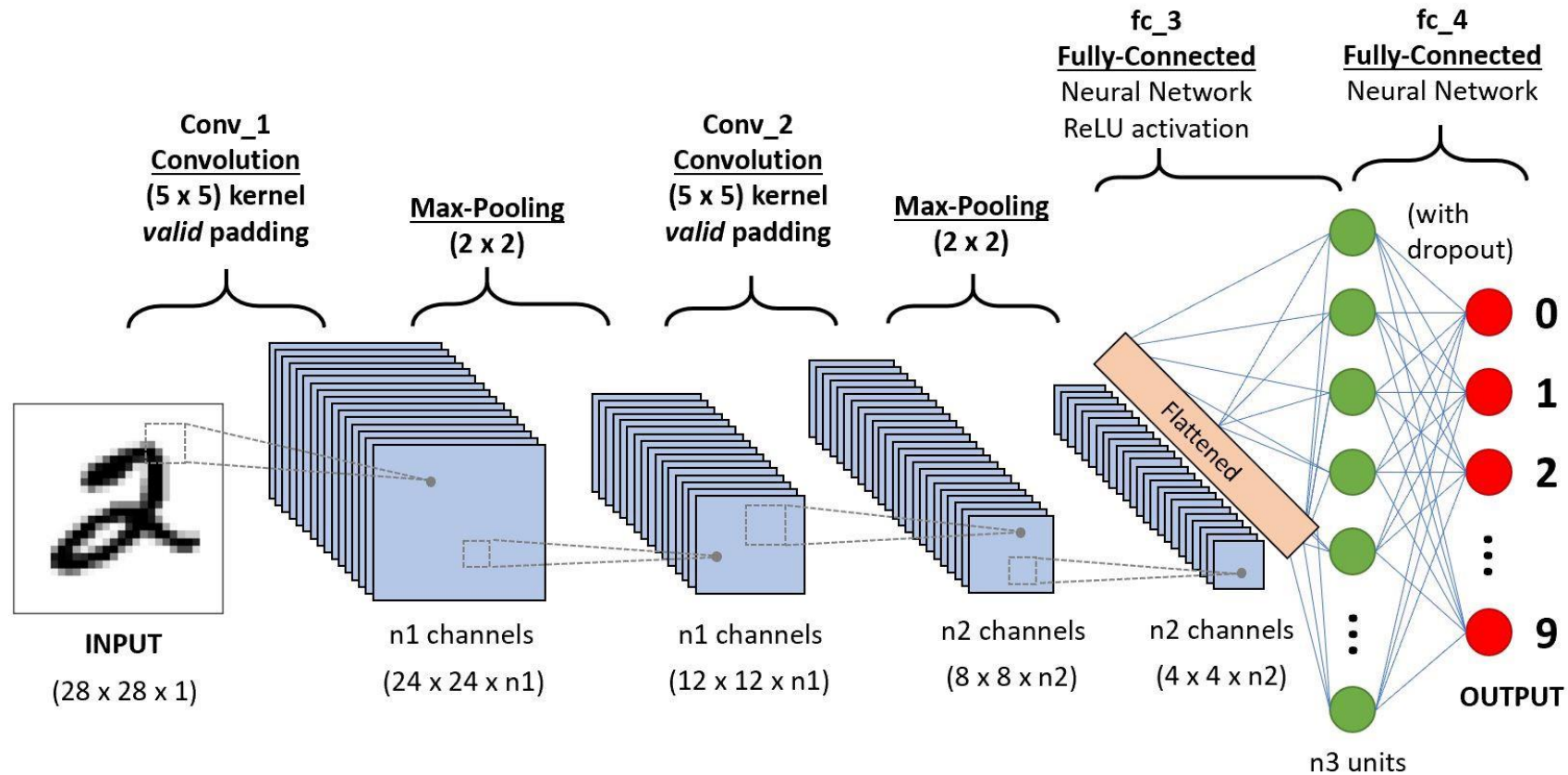
Свёрточные нейронные сети

Размер выхода фильтра может отличаться от размера входа

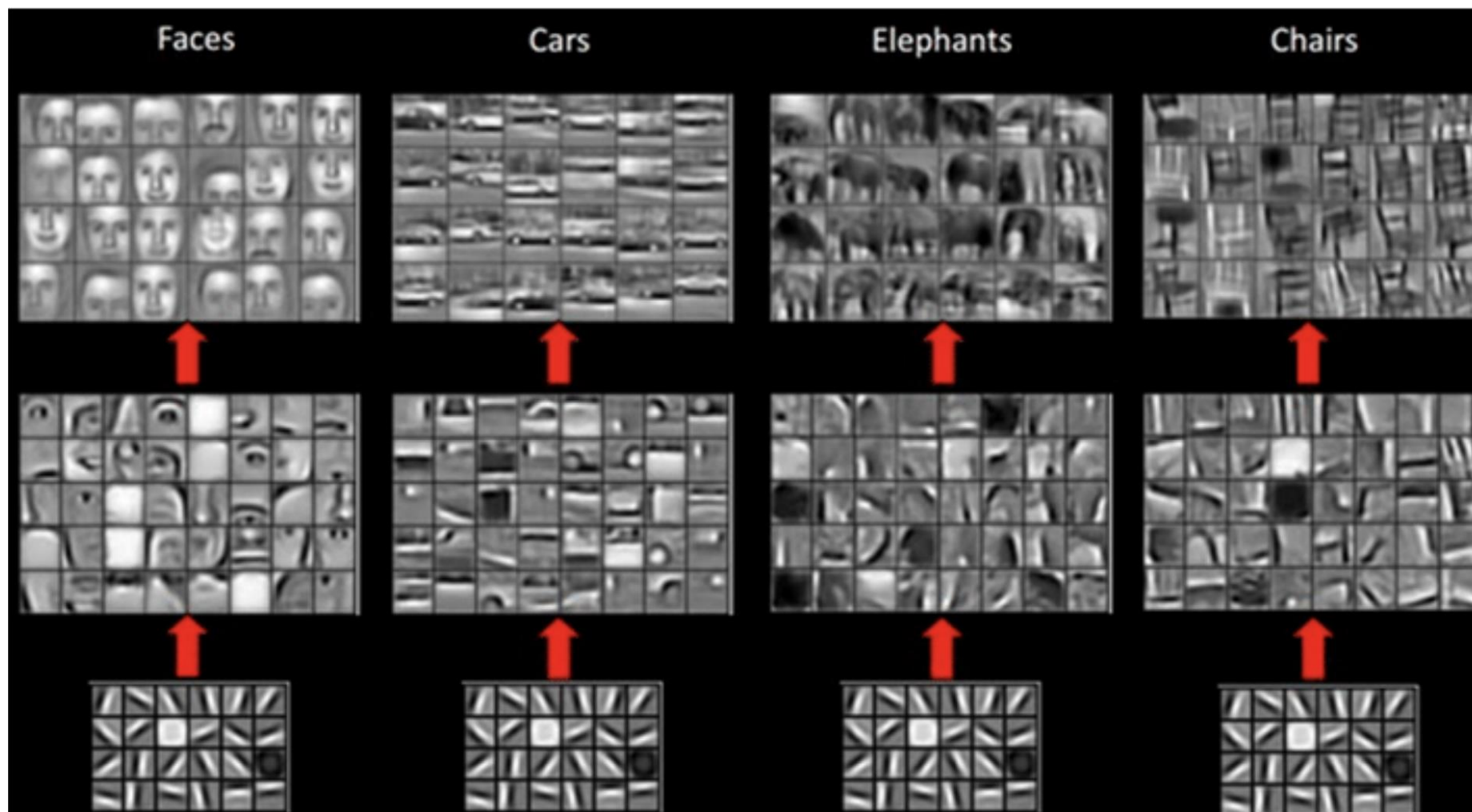
Пример – $n \times n$ Max Pool
filter: отображает вход размерности $n \times n$ в единичный выход, выбирая максимальный элемент среди всех координат входа. Фактически «уменьшает» разрешение в 2 раза, сохраняя контрастность.



Свёрточные нейронные сети



Свёрточные нейронные сети



Память и обучение

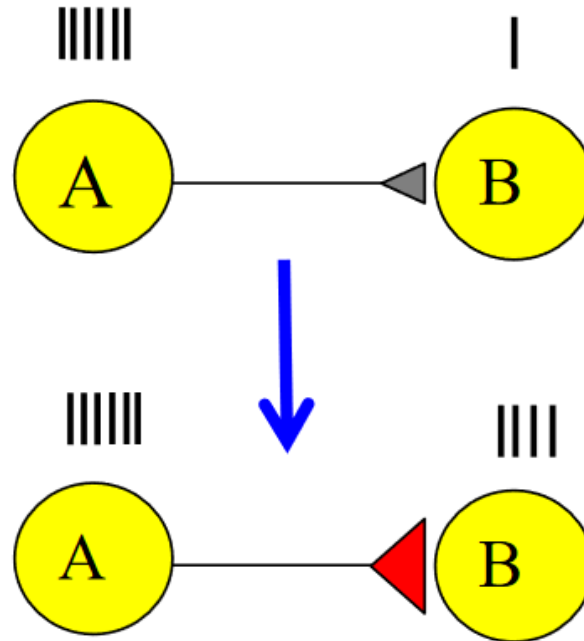
Память в нейронах определяется связями между нейронами (и их «качеством», т.е. количеством и чувствительностью каналов или весами в случае нейронных сетей).

Обучение нейронной сети\мозга – процесс формирования нейронных связей (нахождение весов).

Аналог весов для нейронов – синапсы.

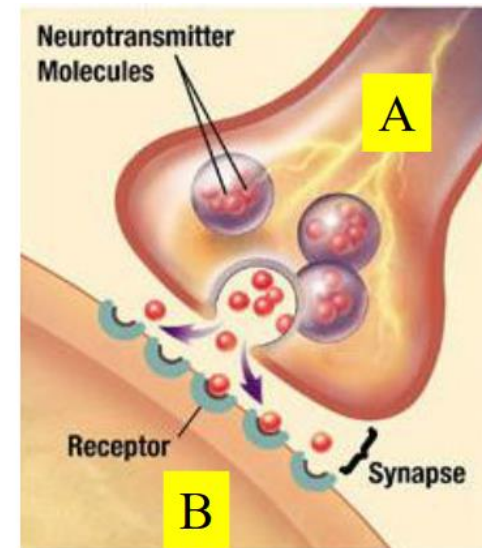
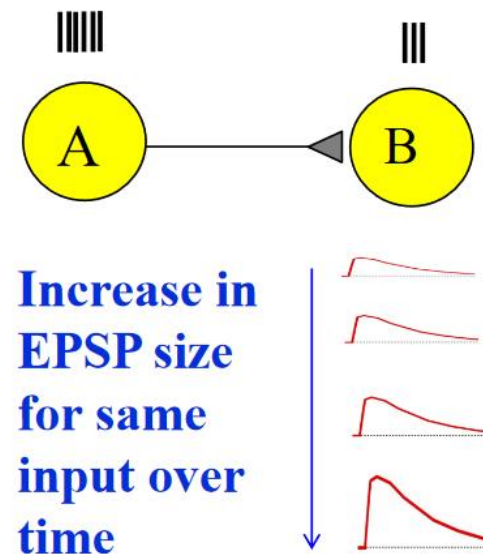
Синапсы

Теория пластичности Хебба – если нейрон А принимает участие в активации нейрона В, тогда синапсы между А и В усиливаются



Долговременная потенцияция (LTP)

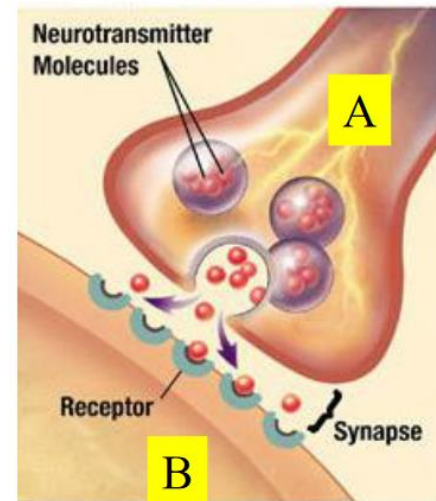
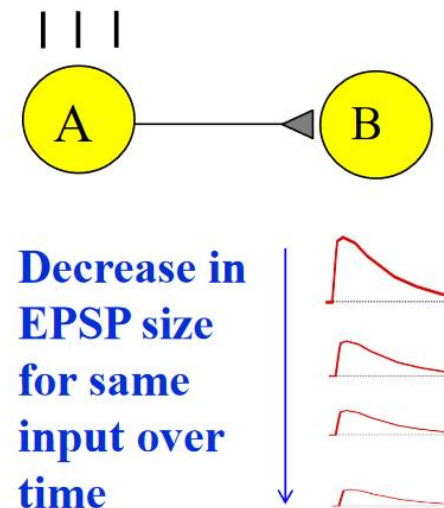
Усиление синаптических связей между нейронами, сохраняющееся в течении длительного времени (часы-дни) после воздействия на синаптический путь.



Долговременная депрессия (LTD)

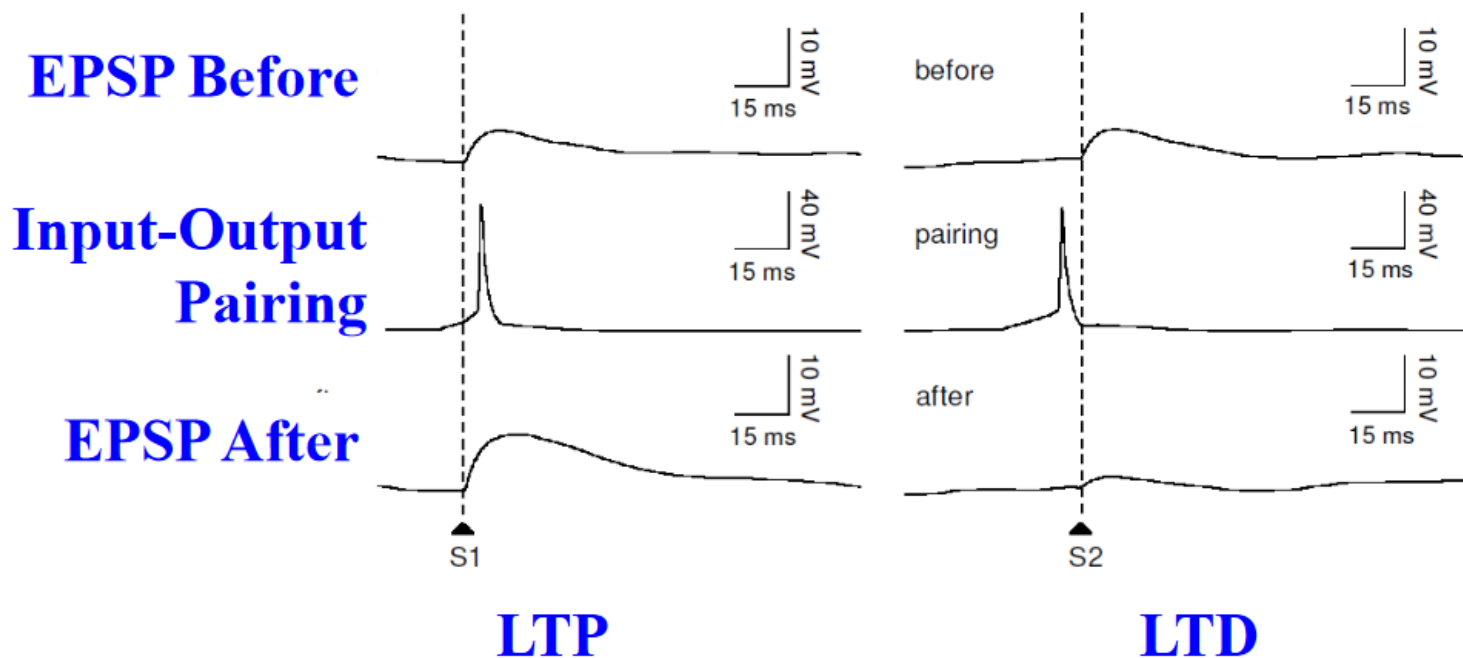
~~Написание диссертации на 42 кафедре~~

Ослабление синаптических связей между нейронами, сохраняющееся в течении длительного времени (часы-дни) после воздействия на синаптический путь.

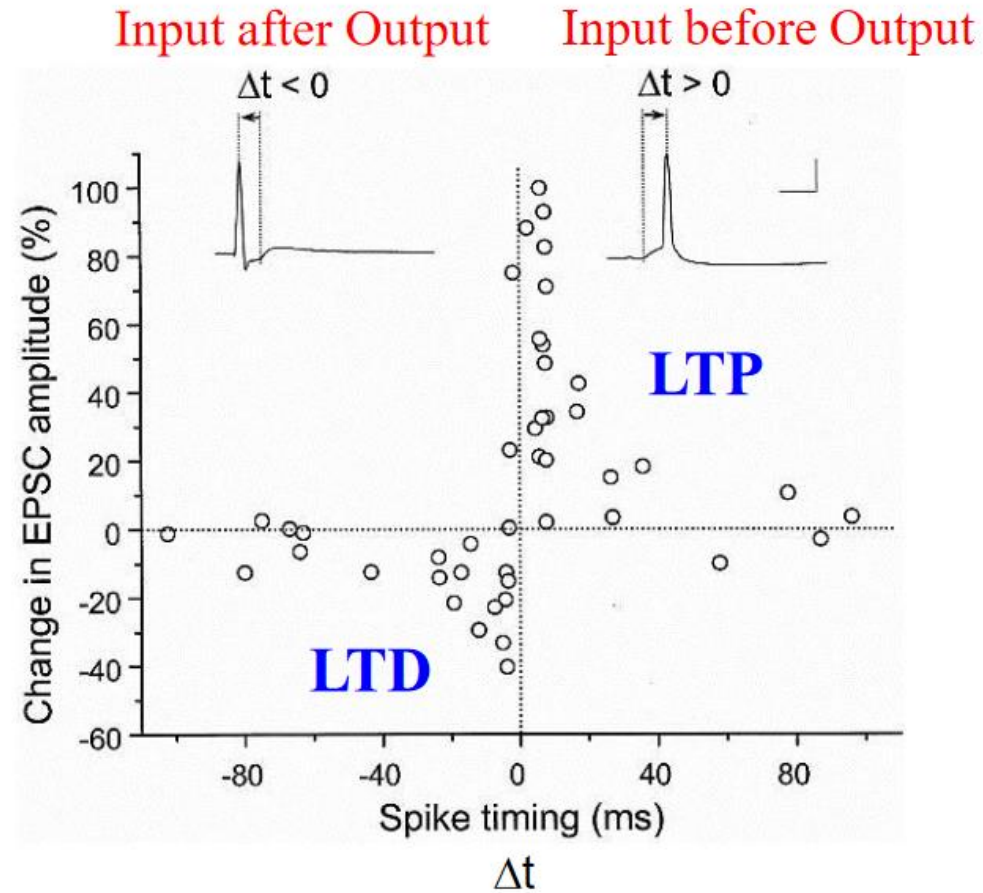


Формирование потенциации и депрессии

LTP и LTD зависят от относительного времени входа и активации нейрона. Если сигнал приходит раньше активации – синапс усиливается. Иначе – ослабляется.



Зависимость LTP и LTD от дельты времени



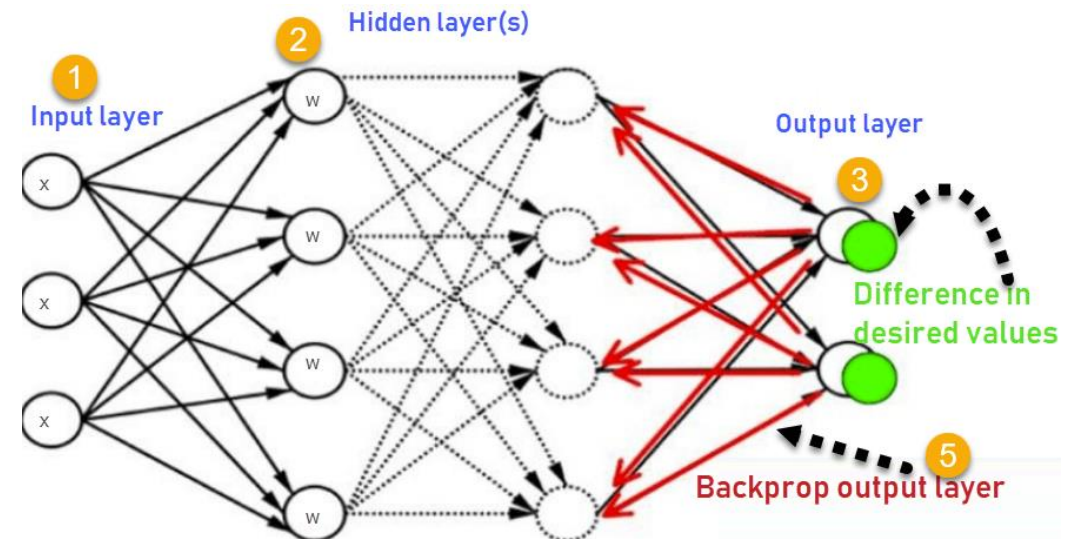
(Bi & Poo, 1998)

Обучение нейронных сетей

Основная идея – метод градиентного спуска.

Итеративно:

- Вычислить значение для элемента обучающей выборки
- Сравнить полученный результат с желаемым, используя метрику
- Вычислить шаг градиента, уменьшающий метрику
- Обновить веса на шаг градиента

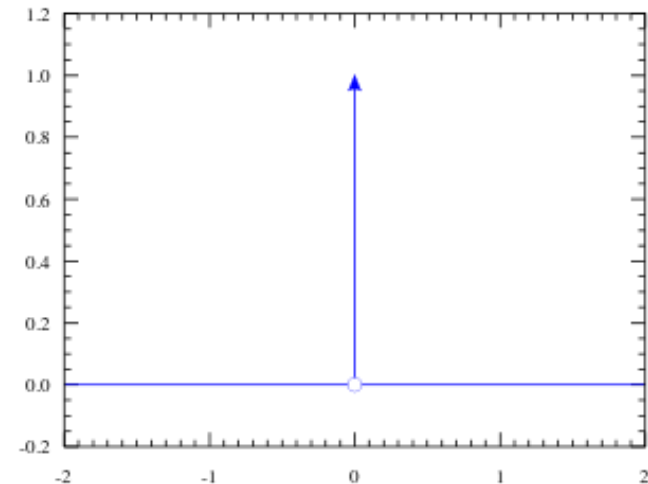


Вычисление градиента

Для вычисления градиента необходимо вычисления производных, в том числе производной функции активации.

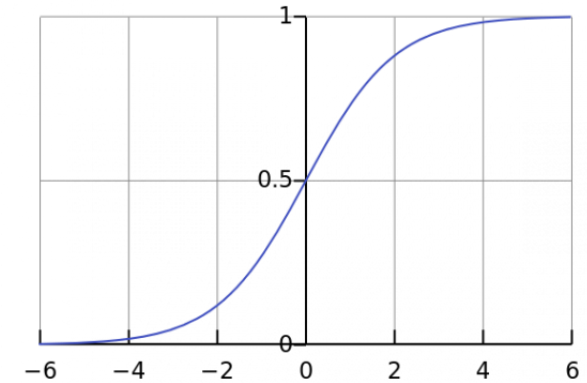
Ранее говорили, что наиболее очевидный кандидат для функции активации – пороговая функция.

Проблема – её производная дельта функция, непонятная мат. Абстракция.

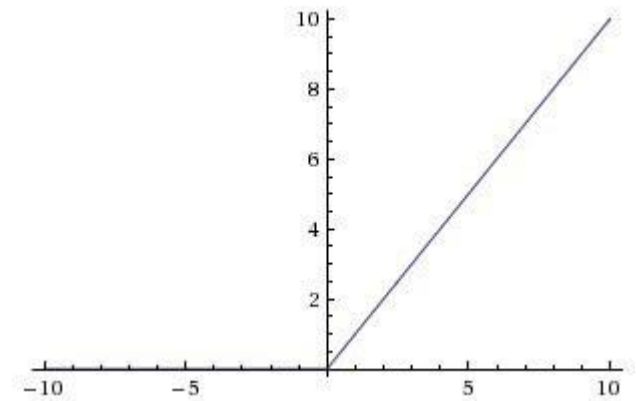


Непрерывное приближение пороговой функции

Сигмоида – экспонента, хорошо дифференцируется, используется на финальных слоях, хорошо даёт значения в интервале $(0,1)$. Нелинейна.



ReLU (rectangular linear unit) – комбинация двух линейных функций, с выколотой точкой для одной из функций в 0. Наглое упрощение сигмоиды, но даёт лучшие результаты при обучении (ибо производная всегда или 0, или константа). Используется везде, кроме последних слоёв.



Способы получения информации нейронной сетью (мозгом)

- Архитектурный – сама структура нейронной сети может способствовать решению задачи (например свёрточные сети лучше распознают изображения)
- Обучение – изменение весов (синапсов) при функционировании сети

Как следствие архитектурного способа мы имеем разделение мозга на отделы, отвечающие за определённые типы обработки информации (например V1 для обработки визуальной информации, предфронтальная кора для самоконтроля итд).

Обучение мозга

В человеческом мозге нет «предубученной» информации, назначения отделов мозга определяются их «особенностями» и архитектурой (типами связей с другими нейронами и типами самих нейронов).

Пример

- Левое полушарие имеет нейроны с короткими аксонами, т.е. нейроны получают и передают информацию преимущественно соседям => быстрое действие => аналитические задачи.
- Правое полушарие имеет нейроны с длинными аксонами, но с меньшим числом соединений. Может получать информацию от более дальних отделов мозга быстрее левого, но связность нейронов внутри полушария меньше => проще строить «неочевидные» связи => творчество, идеи.

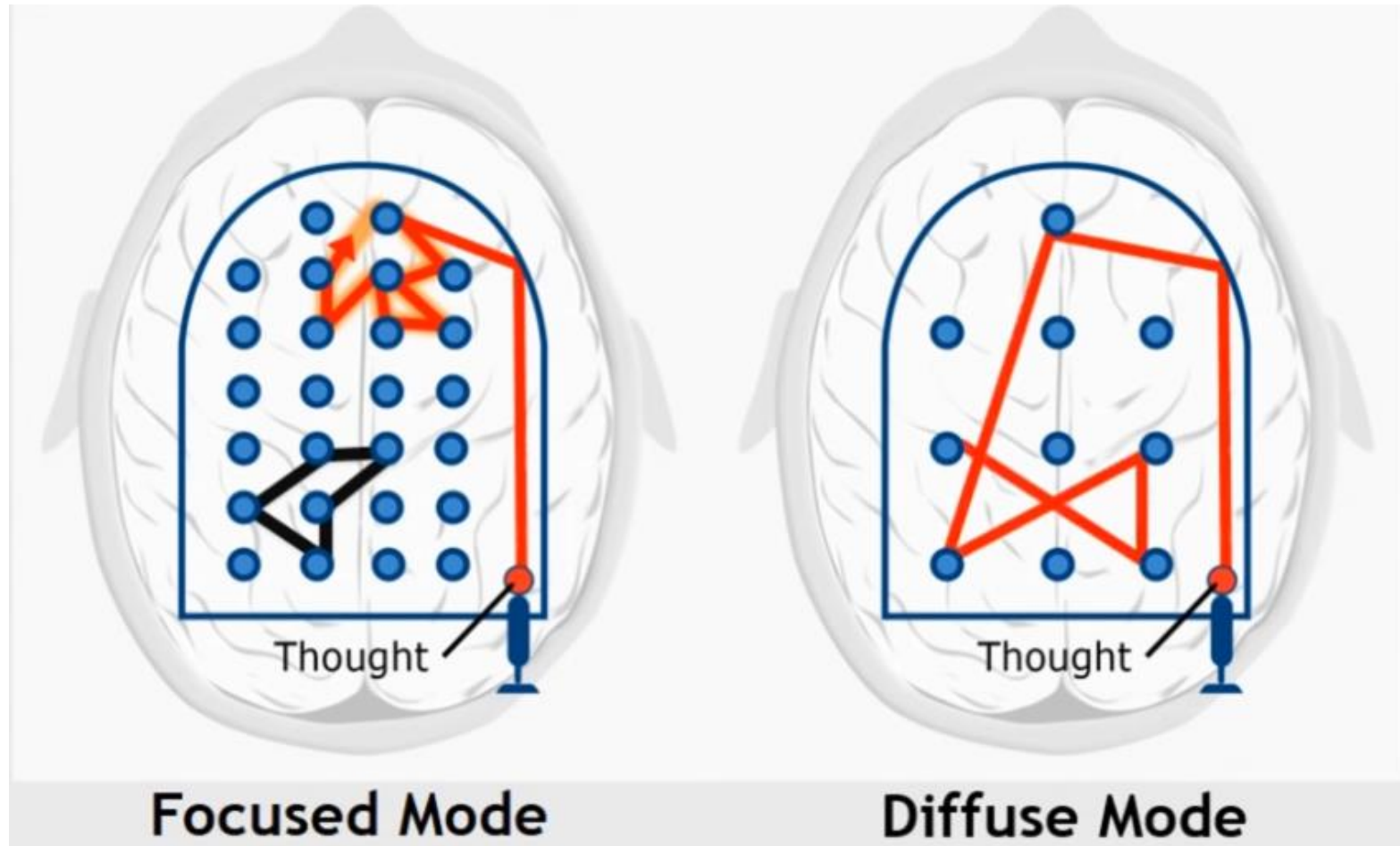
Обучение мозга

Распределение отделов мозга происходит на ранних этапах развития человека после рождения. Известен случай, когда после рождения человеку была удалена большая часть мозга, включая некоторые отделы. Однако выяснилось, что функции этих отделов взяли на себя другие отделы, т.е. оставшийся мозг перераспределил задачи. У взрослых данный механизм не работает, т.к. отделы уже сформированы.

Запоминание информации

- Запоминание информации – формирование синаптических связей
- Воспроизведение информации – формирование сигнала от определённого нейрона или группы нейронов
- При воспроизведении информации усиливаются синаптические связи
- Кратковременные связи разрушаются ночью (слабые связи), сильные - усиливаются

Запоминание информации



Запоминание информации

Оптимальная стратегия запоминания информации

0. Сфокусироваться (без музыки, соц. сетей, прочего)
1. Получить информацию.
2. Воспроизвести информацию.
3. Проверить качество воспроизведённой информации
4. GoTo 2 n times
5. Перерыв
6. GoTo 2.

Coursera – Learning how to learn

Бонус. Фиолетового цвета нет.

- <https://www.youtube.com/watch?v=CoLQF3cfxv0>

