

# Le reti neurali

Alberto Borghese

Università degli Studi di Milano  
Laboratory of Applied Intelligent Systems (AIS-Lab)  
Dipartimento di Informatica  
[alberto.borghese@unimi.it](mailto:alberto.borghese@unimi.it)



A.A. 2017-2018

1/48

<http://borghese.di.unimi.it>



## Sommario



**I neuroni**

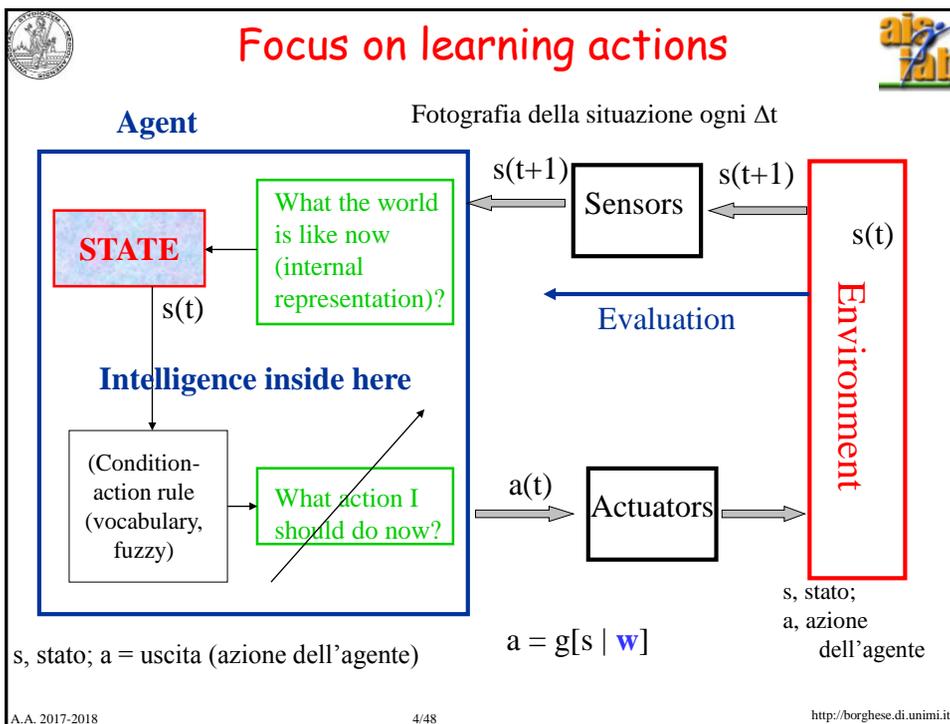
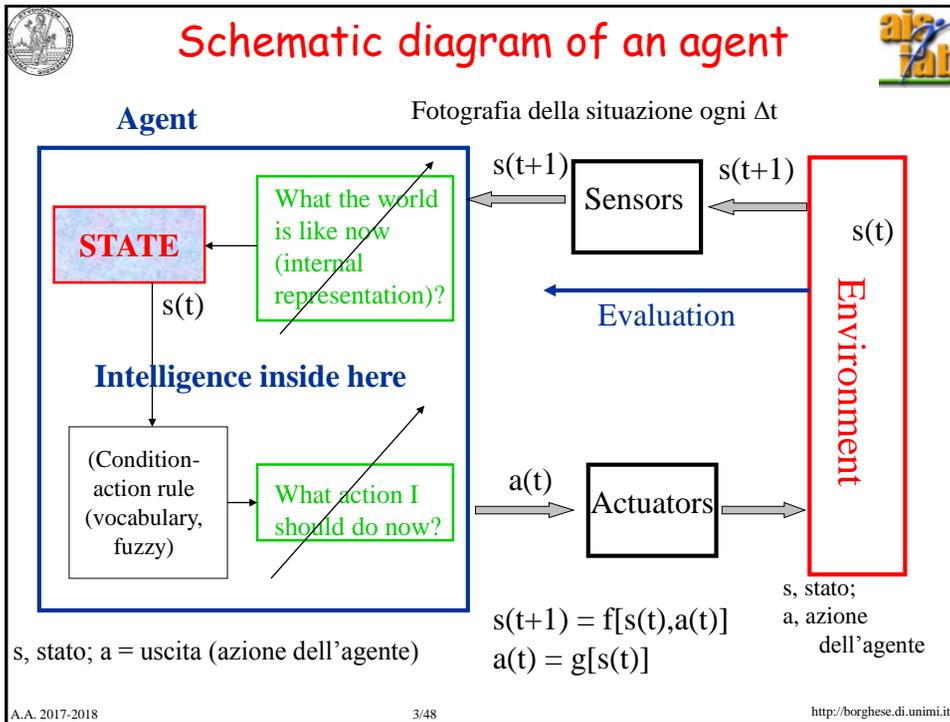
Le reti neurali

Apprendimento sociale

A.A. 2017-2018

2/48

<http://borghese.di.unimi.it>





## Learning



$$a = g[s | \mathbf{w}]$$

Which is the adequate value of  $\{w\}$ ?

How many  $\{w\}$ ?

How is the shape of  $g(\cdot)$  modified by the  $\{w\}$ ?

Which  $g(\cdot)$  shall we use?

=> Parametric models: combination of "simple" functions to obtain  $g(\cdot)$ .

One possibility is to derive such simple functions looking at the behaviour of human neurons.



## Brains cause minds (J. Searle)



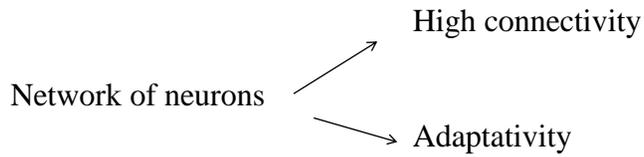
$10^{11}$  Neuroni interconnessi per:

Vedere, parlare, muoverci.....

Giocare a scacchi, appassionarci, discutere, imparare.....



## What is a brain?



Networks implement simple functions that are assembled dynamically according to the complex function required.

Spiking networks

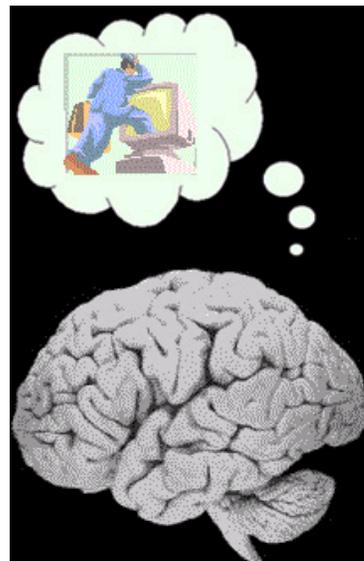


## L'intelligenza biologica



**Connessionismo cellulare** (K. Wernicke and R. Cajal, fine 1800)

- I neuroni sono connessi tra loro in gruppi funzionali.
- Le connessioni sono in numero definito.
- Gruppi funzionali diversi danno origine a funzioni intellettive diverse.

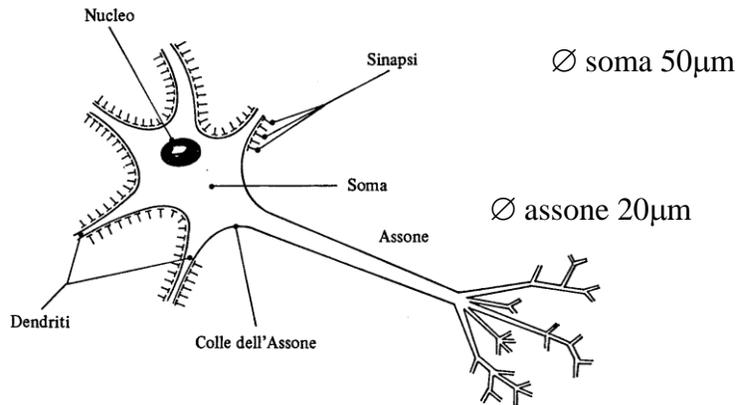




## La struttura del neurone



Morfologicamente molto diversi, funzionalmente simili.



Dendriti: molti – input (da altri neuroni o recettori)

Assone: singolo, si diparte dal colle dell'assone – output (verso altri neuroni o effettori)



## Le cellule gliali

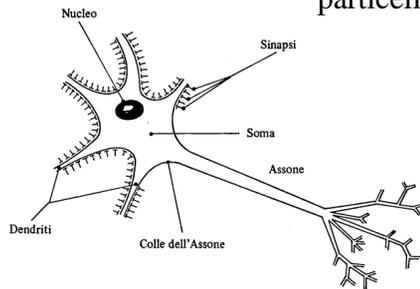


- Sono più rigide. Servono da elementi di supporto, da impalcatura, per posizionare neuroni ed assoni.
- Guidano la crescita dei neuroni durante lo sviluppo.
- Le cellule di Schwann (periferia) e gli oligodendrociti (cervello) formano la mielina.
- Alcune cellule gliali servono per mantenere la pulizia, ad esempio in seguito a fuoriuscita di materiale.



## Il neurone a riposo

Il neurone è separato dall'esterno da una membrana lipidica parzialmente impermeabile (semi-permeabile) al flusso di particelle cariche (ioni).

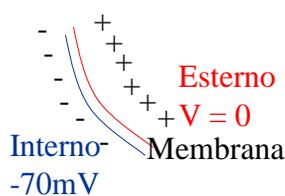


A regime si registra uno squilibrio di ioni (atomi con carica elettrica) tra interno ed esterno, mantenuto attivamente dalla membrana.

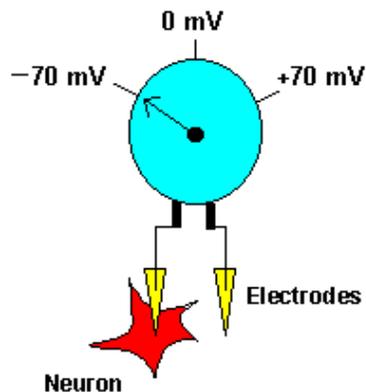
NB lo squilibrio si verifica solo localmente intorno alla membrana.



## Il potenziale di membrana



$$V_m = V_i - V_e = -70\text{mV}$$



Polarizzazione della membrana

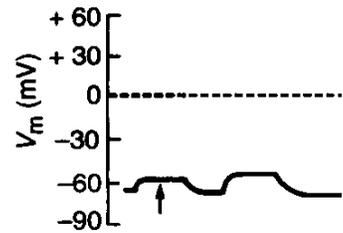


## Il Funzionamento sottosoglia

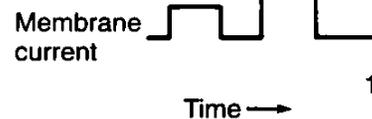


Iniettando corrente (cariche positive), nei dendriti o nel soma, il potenziale di membrana varia seguendo la corrente. Varia la concentrazione degli ioni potassio e sodio all'interno ed all'esterno della cellula.

Chi inietta le cariche?



Potenziale di membrana



## Generazione del potenziale d'azione



Entrano in gioco i canali “voltage-gated”, cioè particolari canali che si aprono e chiudono in particolari condizioni di tensione di membrana.

Canali sodio che si aprono per valori di tensione  $> -50\text{mV}$  e si chiudono per valori di tensione  $> 30\text{mV}$  e per gradienti positivi.

Canali potassio che si aprono per valori di tensione  $> +30\text{mV}$ .

Fenomeno molto rapido dell'ordine di 1-2ms.

Si concentra intorno al colle dell'assone.



## Potenziale d'azione: depolarizzazione



Quando la cellula viene depolarizzata oltre una certa soglia, si aprono canali sodio in grande quantità (*canali voltage-dependent*).

### A) *Depolarizzazione.*

- 2) La quantità di ioni sodio che fluiscono verso l'interno è molto maggiore della quantità di ioni potassio che fluiscono verso l'esterno.
- 3) Il potenziale diminuisce ulteriormente fino ad invertirsi.
- 4) Questo a sua volta fa aprire un numero maggiore di canali sodio (notare che il potenziale sale sopra i  $-75\text{mV}$ ).

Questa situazione potrebbe durare indefinitamente, il potenziale di membrana tende a  $+55\text{mV}$  (resting potential del sodio).



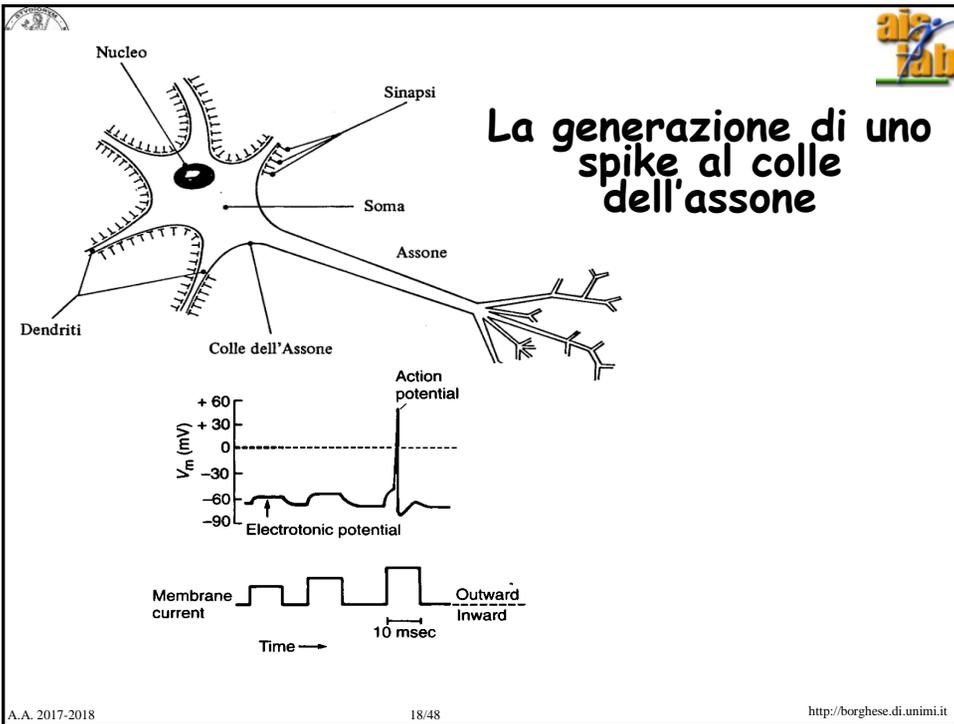
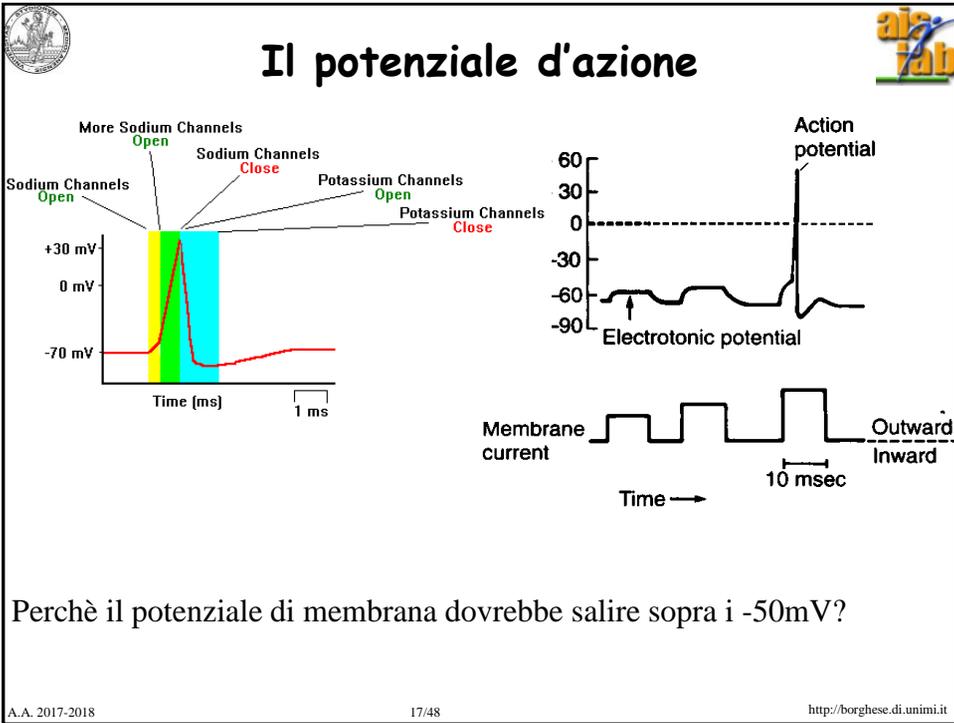
## Potenziale d'azione: ripolarizzazione



### B) *Ripolarizzazione.*

- 5) Si richiudono i canali sodio (i canali voltage-dependent si aprono velocemente quando la tensione raggiunge una certa soglia e poi si chiudono con una temporizzazione fissa, indipendente dalla tensione).
- 6) Si aprono dei canali potassio voltage-dependent, i quali accelerano il passaggio degli ioni potassio verso l'esterno. Questi a loro volta si chiudono con una loro costante di tempo.

E tutto torna come prima. Rimane attiva la pompa sodio-potassio che mantiene la membrana alla tensione di riposo.





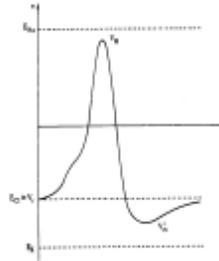
## Requisiti sulla propagazione del segnale neurale



2 requisiti:

La generazione del potenziale d'azione richiede energia chimica.

Si vuole una trasmissione “pulita” del segnale, per distanze che possono arrivare ad 1m.



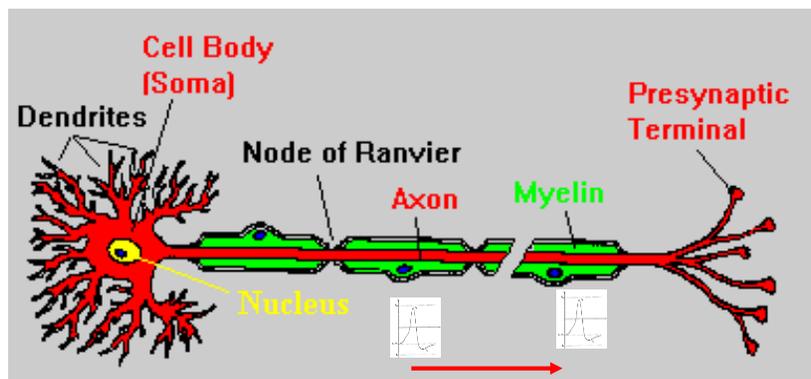
A.A. 2017-2018

19/48

<http://borghese.di.unimi.it>



## Propagazione del segnale neurale



$\varnothing = 0.2 \div 20 \mu\text{m}$

**Mielina.** Protezione contro la dispersione (filtraggio limitato).

La demielinizzazione porta a una cattiva conduzione del segnale elettrico (spike)

Ripetizione del segnale ad ogni Nodo di Ranvier.

A.A. 2017-2018

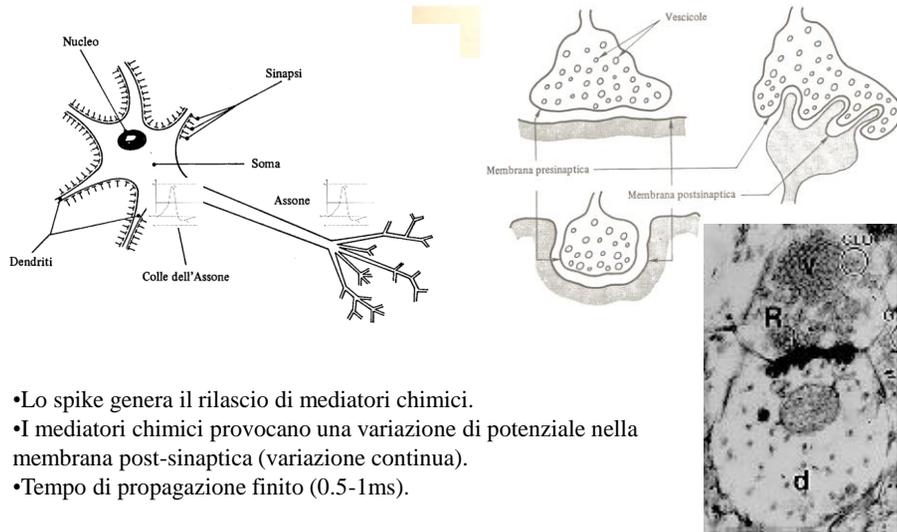
20/48

<http://borghese.di.unimi.it>



# Le sinapsi

Sono l'interfaccia, la porta di I/O del neurone.



- Lo spike genera il rilascio di mediatori chimici.
- I mediatori chimici provocano una variazione di potenziale nella membrana post-sinaptica (variazione continua).
- Tempo di propagazione finito (0.5-1ms).

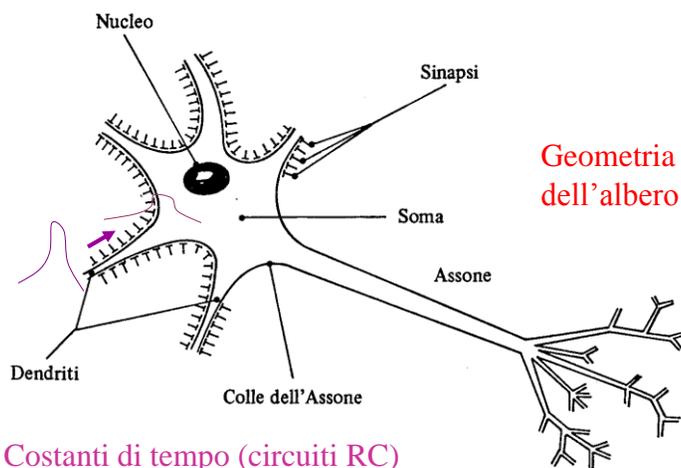
A.A. 2017-2018

21/48

<http://borghese.di.unimi.it>



# L'integrazione nel corpo cellulare



Geometria computazionale dell'albero dendritico.

- Costanti di tempo (circuiti RC)
- Interazioni non-lineari
- Sinapsi eccitatorie ed inibitorie

Integrazione spazio-temporale degli input sinaptici.

A.A. 2017-2018

22/48

<http://borghese.di.unimi.it>



## I dendriti



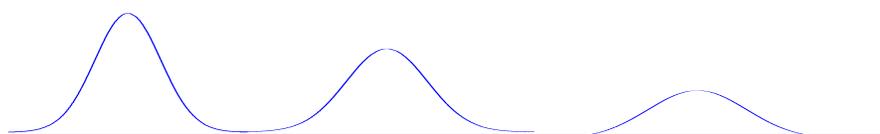
- Hanno una resistenza ed una capacita'. Serie di circuiti RC.  
Risultato:
- 1) Il segnale si attenua,
- 2) la curva del potenziale d'azione si spampana (spread temporale),
- 3) viene introdotto un ritardo temporale a livello di soma.

Le regole che definiscono la relazione tra I/O dei neuroni in modo che devono rispettare i principi di integrazione spaziale e temporale:  
**ruolo computazionale della geometria dell'albero dendritico.**

**Il dendrita funziona come un grande integratore capace di effettuare sommatorie spaziali e temporali.**



## Post-synaptic potential propagation



Synaptic site

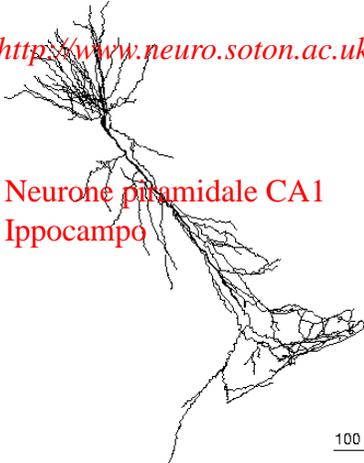
Filtering effects:

Attenuation with space  
(with distance) and time.

Increase of the peak spread.

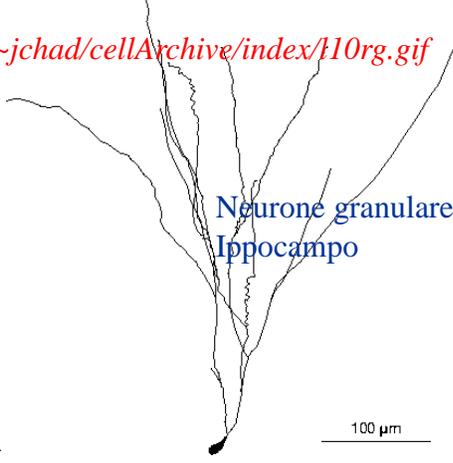
## Il neurone

<http://www.neuro.soton.ac.uk/~jchad/cellArchive/index/110rg.gif>



Neurone piramidale CA1  
Ippocampo

100  $\mu\text{m}$



Neurone granulare  
Ippocampo

100  $\mu\text{m}$

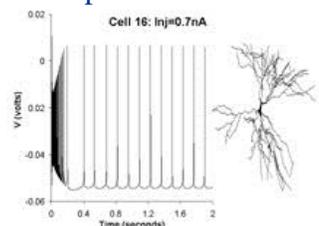
- Grande variabilità nella morfologia.
- Funzionamento stereo-tipato.
- Stazione elementare di elaborazione dell'informazione.

**Dove può avvenire l'elaborazione dell'informazione?**

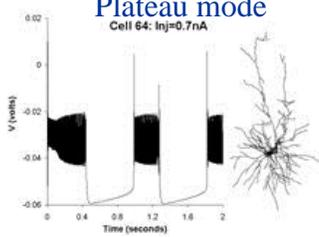
nimi.it

## Morfologia e funzionamento del neurone

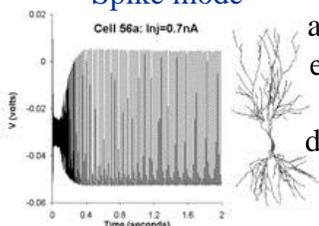
**Spike mode**  
Cell 16: Inj=0.7nA



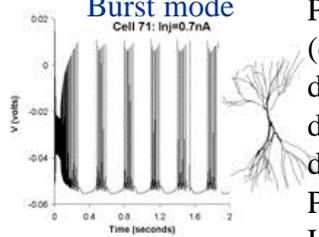
**Plateau mode**  
Cell 64: Inj=0.7nA



**Spike mode**  
Cell 56a: Inj=0.7nA



**Burst mode**  
Cell 71: Inj=0.7nA



Il pattern di attivazione (tipologia e frequenza) dipende dalla topologia dell'albero dendritico.

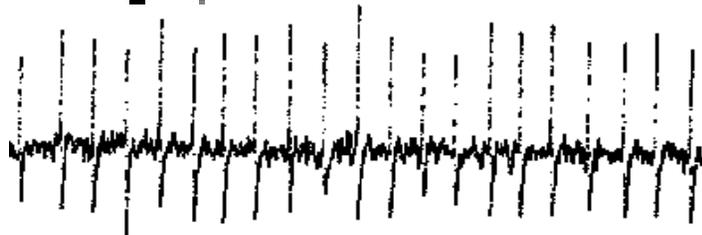
Parametri considerati (e.g.) Diminuzione del diametro del dendrita con la distanza dal soma.... Parametri ricavati da L-systems.

**Qual è la relazione tra alterazione della struttura del neurone e patologia?**

A.A. 2017-2018 26/48 http://borghese.di.unimi.it



## Il suono del neurone



- Codice di frequenza.
- Periodo di refrattarietà.

A.A. 2017-2018

27/48

<http://borghese.di.unimi.it>



## Brain characteristics

Number of neurons (adult)*	20,000,000,000 - 50,000,000,000
Number neurons in cerebral cortex (adult)	about 20,000,000,000 (some sources have incorrect number 8,000,000)
Number of synapses (adult)	$10^{14}$ (2,000-5,000 per neuron)
Weight Birth	0.3 kg, 1 y/o 1 kg, puberty 1.3 kg, adult 1.5 kg
Power consumption (adult)	20-40 Watts (0.5-4 nW/neuron)
Percentage of body	2% weight, 0.04-0.07% cells, 20-44% power consumption
Genetic code influence	1 bit per 10,000-1,000,000 synapses
Atrophy/death of neurons	50,000 per day (between ages 20 and 75)
Sleep requirement (adult)	average 7.5 hours/day or 31%
Normal operating temperature	$37 \pm 2^\circ\text{C}$
Maximum firing frequency of neuron	250-2,000 Hz (0.5-4 ms intervals)
Signal propagation speed inside axon	90 m/s sheathed, <0.1 m/s unsheathed
Processing of complex stimuli	0.5s or 100-1,000 firings

A.A. 2017-2018

28/48

<http://borghese.di.unimi.it>

From Vadim Gerasimov's slides



## Pentium IV 1.5Ghz



Number of transistors	4.2*10 <sup>7</sup>
Power consumption	up to 55 Watts
Weight	0.1 kg cartridge w/o fans, 0.3 kg with fan/heatsink
Maximum firing frequency	1.5 GHz
Normal operating temperature	15-85°C
Sleep requirement	0 (if not overheated/overclocked)
Processing of complex stimuli	if can be done, takes a long time

From Vadim Gerasimov's slides



## Sommario



I neuroni

**Le reti neurali**

Apprendimento sociale



## Le reti neurali

Se il neurone biologico consente l'intelligenza, perché non dovrebbe consentire l'intelligenza artificiale un neurone sintetico?

“.. a neural network is a system composed of **many simple processing elements** operating in **parallel** whose function is determined by **network structure, connection strengths**, and the **processing performed at computing elements** or nodes. ... Neural network architectures are inspired by the architecture of biological nervous systems, which use many simple processing elements operating in parallel to obtain high computation rates”. (DARPA, 1988)....

Now, this is called learning with Kernels



## A cosa servono?

Le reti neurali offrono i seguenti specifici vantaggi nell'elaborazione dell'informazione:

- Apprendimento basato su esempi (non è richiesta l'elaborazione di un modello aderente alla realtà)
- Autoorganizzazione dell'informazione nella rete
- Robustezza ai guasti (codifica ridondante dell'informazione)
- Funzionamento in tempo reale (realizzazione HW)
- Basso consumo ( $0.5\text{nW} \div 4\text{nW}$  per neurone, 20W per il SN).





## Cosa sono le reti neurali artificiali?



- Le reti neurali sono modelli non lineari per l'**approssimazione** della soluzione di problemi dei quali non esiste un modello preciso (o se esiste è troppo oneroso computazionalmente). I parametri dei modelli risultanti (semiparametrici) vengono calcolati mediante l'utilizzo di esempi (dati di ingresso e uscita desiderata). Connessioni con il dominio della statistica.
- Vengono utilizzate soprattutto per la classificazione e la regressione.
- Sono un capitolo importante negli argomenti di intelligenza artificiale.
- Da un altro punto di vista possono essere utilizzate per lo studio delle reti neurali naturali, ovvero dei processi cognitivi.
- Sono state incorporate nel "machine learning".



## Il modello "rete neurale"



Modello: rappresentazione parametrizzata di un fenomeno

$$y = f(x | w)$$

Dove i parametri  $w$  definiscono la forma di  $f$  e quindi della mappatura tra gli ingressi e le uscite.

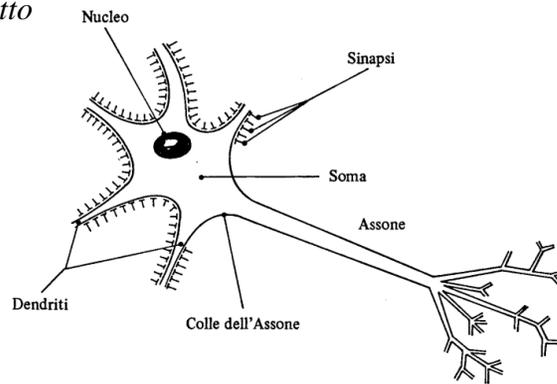
I parametri  $w$  vengono determinati per ottenere una mappatura  $f(\cdot)$  congruente con i dati in ingresso e uscita misurati (apprendimento supervisionato).

In particolare  $f(\cdot)$  è ottenuta combinando assieme tante funzioni elementary che operano trasformazioni stereotipate sui dati (e.g. Gaussiane, Sigmoidali, Lineari ...).



# Il neurone artificiale

- *Potenziale di azione (tutto o nulla).*
- *Integrazione nel soma.*
- *Soglia di attivazione.*



Neurone come elemento di calcolo universale: in grado di calcolare qualsiasi funzione logica (cioè implementabile in un computer).



# Il modello di McCulloch-Pitts

• La variazione delle forma d'onda del potenziale di membrana lungo il dendrita non viene considerata.

• Gli input non sono sincroni.

$$y_i(t+1) = \Theta(w_{ij}u_j(t) - \mu_i)$$

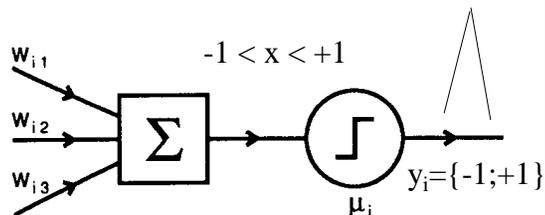
• Le interazioni tra input non sono lineari.

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq 0 \\ -1 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

• I pesi sono supposti costanti.

• Descrizione nel tempo.

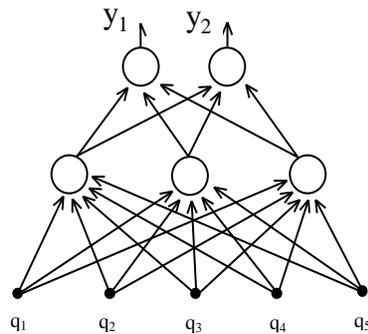
Sono state pensate per calcolare **funzioni logiche (V o F)**.



McCulloch-Pitts (1943)



## Spiking neurons



**Spiking neurons.** Sono neuroni la cui uscita è il singolo spike. Modellazione realistica (e.g. McCullochPitts). **Spike del neurone.** Registrazione dell'uscita di un insieme di neuroni nel tempo.

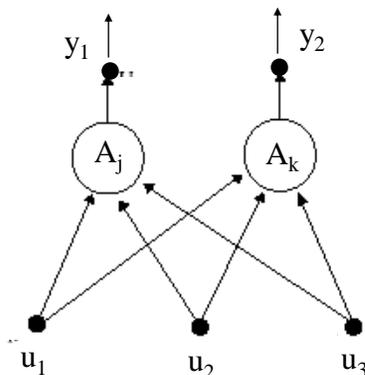
**Connessionismo classico.** Uscita compresa tra min – Max. **Frequenza di scarica.** Frequenza di scarica in uscita in funzione della frequenza di scarica dei vari ingressi.



## La rete neurale ad un livello



La rete opera una trasformazione dallo spazio di input allo spazio di output. Visione “spaziale” e non temporale.



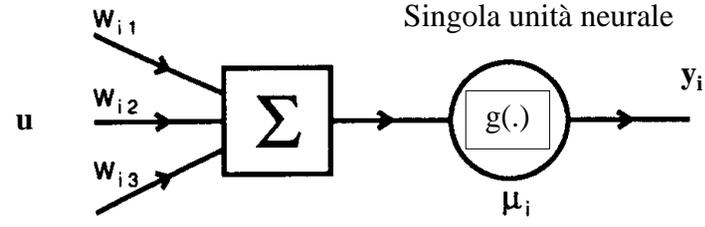
$$y_i = g(w_{ij}u_j - \mu_i)$$

La trasformazione o mappatura dipende dai parametri  $\{w_{ij}\}$  e  $\{\mu_i\}$  in modo tale che la rete neurale approssimi la trasformazione tra i pattern di input e di output.

Se  $g(.) = 1$ , la rete diventa un modello lineare:  $y_i = w_{ij}u_j - \mu_i$

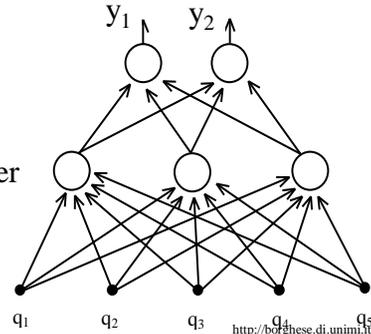


## Una rete neurale a più livelli

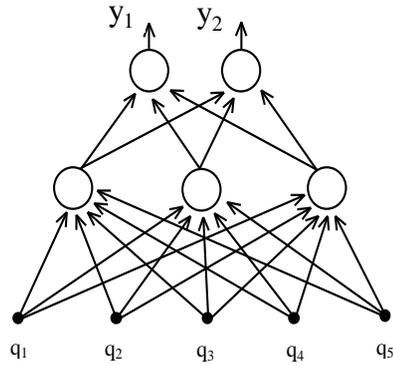


$$y_i = g(w_{ij}u_j - \mu_i)$$

Unità nascoste – Hidden layer



## Caratteristiche



Livelli di unità di attivazione

Collegamento in cascata

Input convergenti, output divergenti.

Capacità di approssimazione universale

**Perceptrone:** layered networks, flusso unidirezionale dell'elaborazione.

L'output viene interpretato come frequenza di scarica del neurone d'uscita della rete.



## Complessità della funzione realizzabile

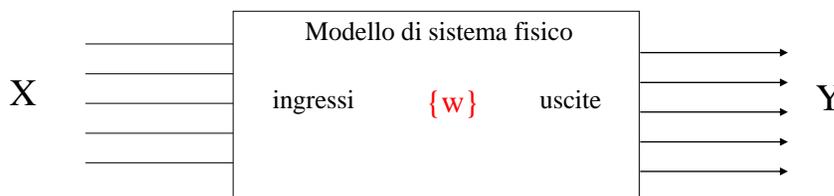


Quanti più neuroni artificiali vengono connessi tanto più la funzione complessiva approssimabile diviene più complessa

$$Y = |y_1, y_2, y_3, \dots, y_n|^T$$

$$y_i = g(X)$$

$$X = |x_1, x_2, x_3, \dots, x_m|^T$$



Reti neurali = approssimatori universali.

A.A. 2017-2018

41/48

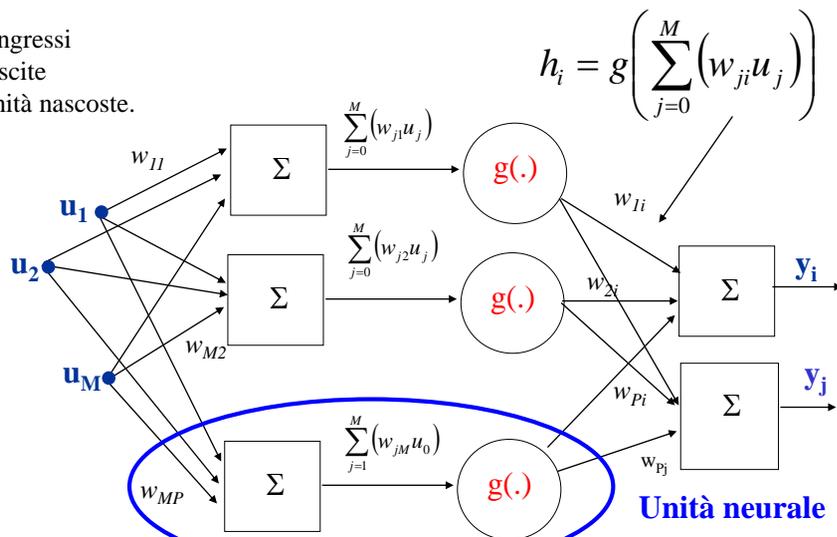
<http://borghese.di.unimi.it>



## MLP : Multi-layer Perceptron



- M ingressi
- N uscite
- P unità nascoste.



Unità neurale

Livello d'uscita: unità lineari.

Livello intermedio: unità non-lineari

$$y_i = \sum_{k=0}^P (w_{ki} h_k(\cdot))$$

12/48



## Riassunto - topologia



I neuroni connessioneisti sono basati su:

- Ricevere una somma pesata degli ingressi.
- Trasformarla secondo una funzione non-lineare (scalino o logistica)
- Inviare il risultato di questa funzione all'uscita o ad altre unita'.

Le reti neurali sono topologie ottenute connettendo tra loro i neuroni in modo opportuno e riescono a calcolare funzioni molto complesse.



## Riassunto - Apprendimento



Algoritmi iterativi per adattare il valore dei parametri (pesi).

Definizione di una funzione costo che misura la differenza tra valore fornito e quello desiderato.

Algoritmo (gradiente) che consente di aggiornare i pesi in modo da minimizzare la funzione costo.

Training per pattern (specializzazione) o per epoche.



## Sommario



I neuroni

Le reti neurali

Apprendimento sociale



## Mirror neurons - neuroni specchio



<http://www.youtube.com/watch?v=O3-wegp1ovM>

I Neuroni specchio

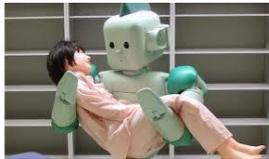




## Social robotics



«Per definizione un robot sociale dovrebbe comunicare ed interagire con gli umani o con altri esseri viventi in situazioni che possono essere definite cooperative. Ma anche comportamenti non cooperativi possono essere considerati sociali in alcune situazioni. Il robot può, ad esempio, esibire un comportamento competitivo all'interno del contesto di un gioco. Il robot potrebbe anche interagire, in alcuni casi con nessuna o con una minima comunicazione. Potrebbe ad esempio consegnare strumenti ad un astronauta che lavori su una stazione spaziale» (Wikipedia).



Video on Qrio dancing salsa



## Sommario



I neuroni

Le reti neurali

Apprendimento sociale