Spiking Neurons

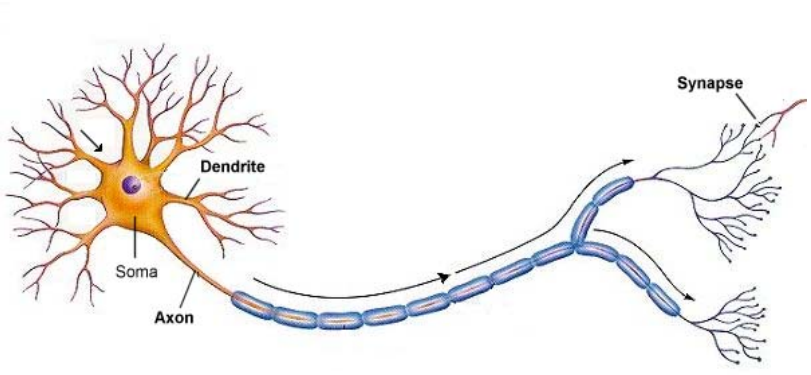
Pietro Mele 2004
pietromele@yahoo.com
www.geocities.com/pietromele

Spiking neurons...

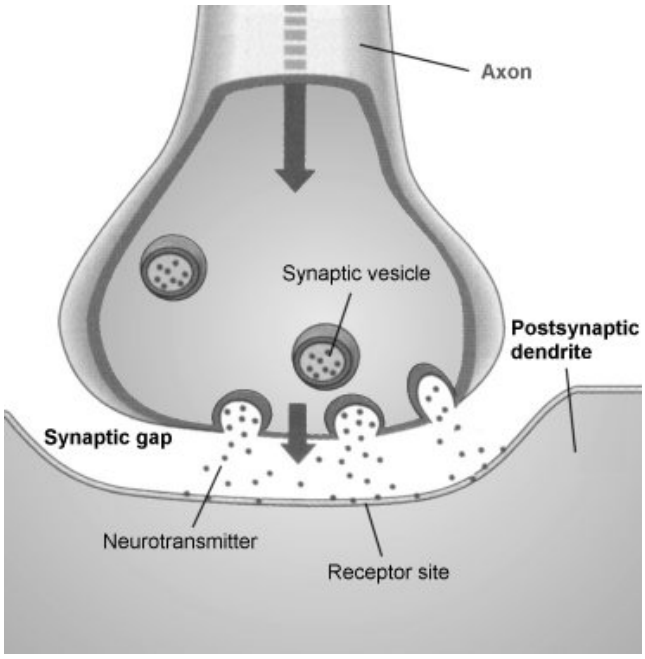
...in italiano:
neuroni basati su potenziali d'azione

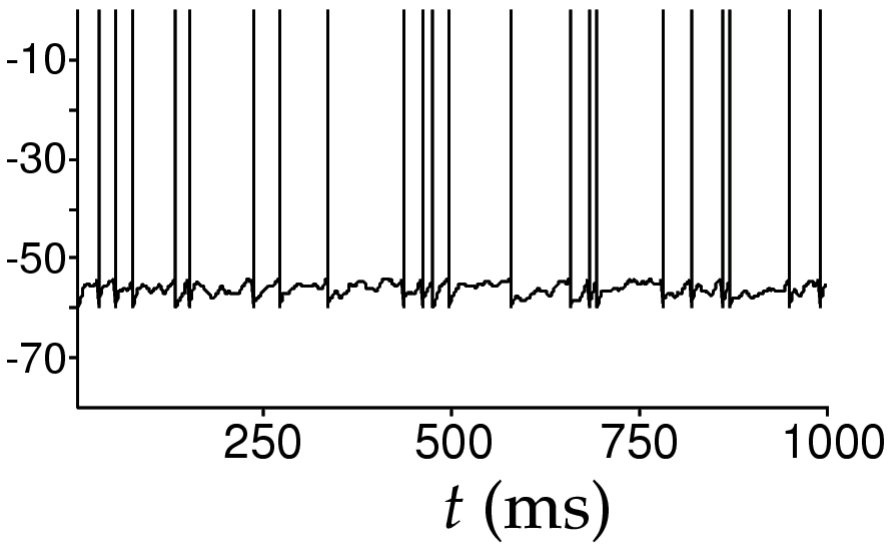
Modello di neurone

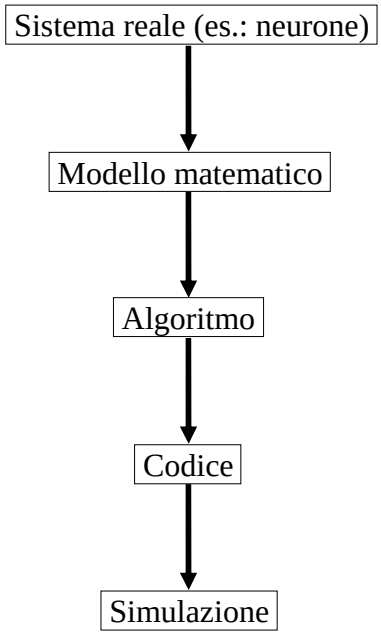
$$y = f(x, t)$$

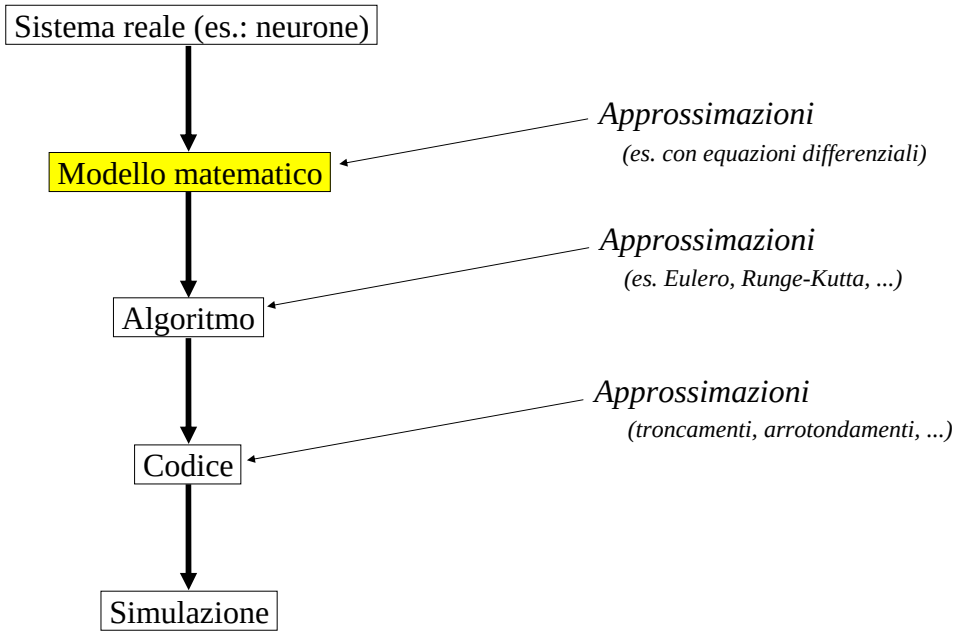


Spiking Neurons - Pietro Mele 2004 - pietromele@yahoo.com


Axon
Synaptic vesicle
Postsynaptic dendrite
Synaptic gap
Neurotransmitter
Receptor site


-10
-30
-50
-70
250
500
750
1000
t (ms)


Sistema reale (es.: neurone)
Modello matematico
Algoritmo
Codice
Simulazione


Sistema reale (es.: neurone)
Modello matematico
Algoritmo
Codice
Simulazione
Approssimazioni
(es. con equazioni differenziali)
Approssimazioni
(es. Eulero, Runge-Kutta, ...)
Approssimazioni
(troncamenti, arrotondamenti, ...)

Modelli matematici

Realismo / complessità

Compartmental models

Hodking-Huxley

Integrate and fire

Spiking Neuron

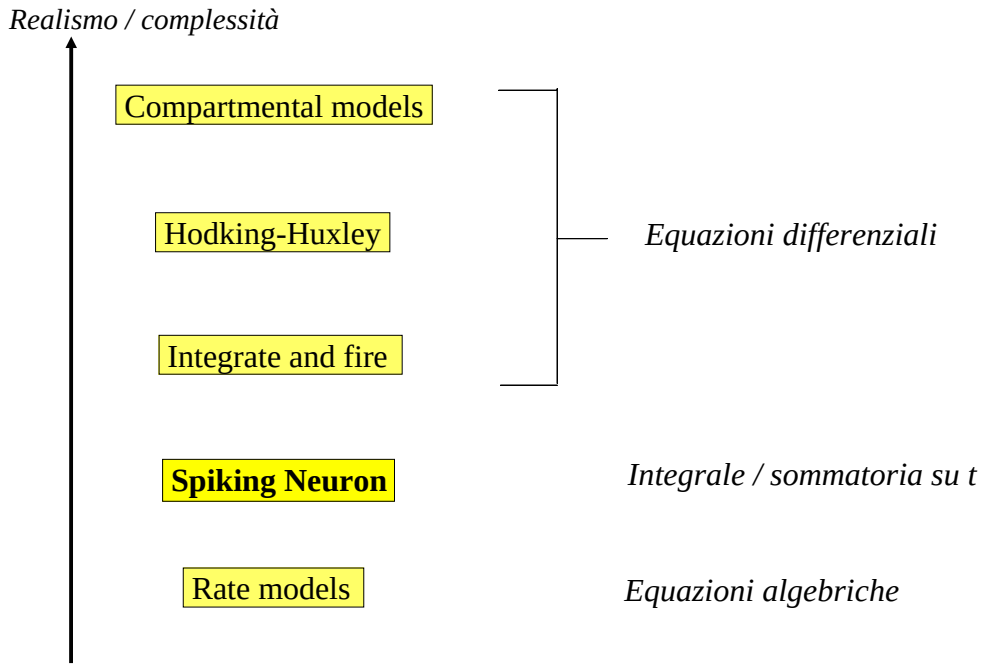
Rate models

Modelli matematici

Realismo / complessità

Compartmental models	*Struttura spaziale, ...*
Hodking-Huxley	*Correnti ioniche*
Integrate and fire	*R e C in parallelo, f(V)*
Spiking Neuron	*Funzione di* $\left(t_i^{(f)} - t_j^{(f)}\right)$
Rate models	*Grande scala temporale*

Modelli matematici



Rate models

- Grande scala temporale.

- Il comportamento del neurone viene approssimato con una media su un intervallo di tempo *molto* lungo.

- Vantaggi:
  - Semplicità del modello.

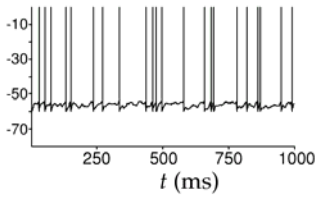
- Svantaggi:
  - Più è lungo l'intervallo di tempo, più sono i dettagli del funzionamento del neurone che vengono persi.
  - Non realistico in molte situazioni: possiamo identificare un'immagine in meno di 100 ms --> non c'è tempo di fare medie!

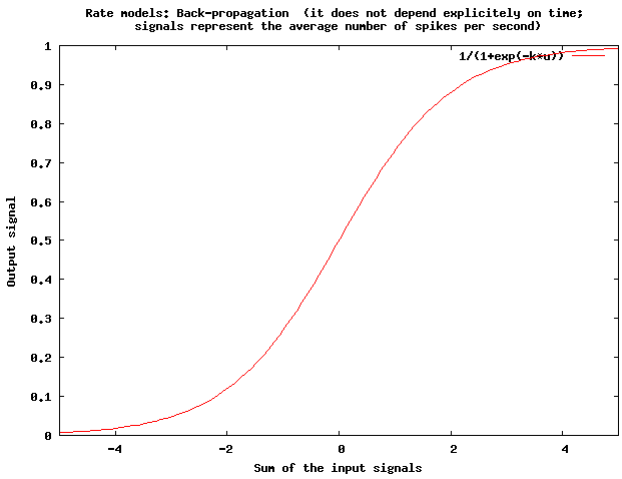
Rate models

Un modello **non** dipendente dal tempo: ***Multi-layer Perceptron***

$$\nu_i = g\left(\sum_j w_{ij}\nu_j\right)$$

Funzione di trasferimento *g*:





Nel cervello:

- La durata di uno spike è dell'ordine di 1-2 ms.

- In genere gli spikes sono simili tra loro, quindi l'unica informazione che trasmettono è contenuta nell'istante di tempo in cui sono generati.

Spiking Neuron

- Vengono considerati i singoli spikes.

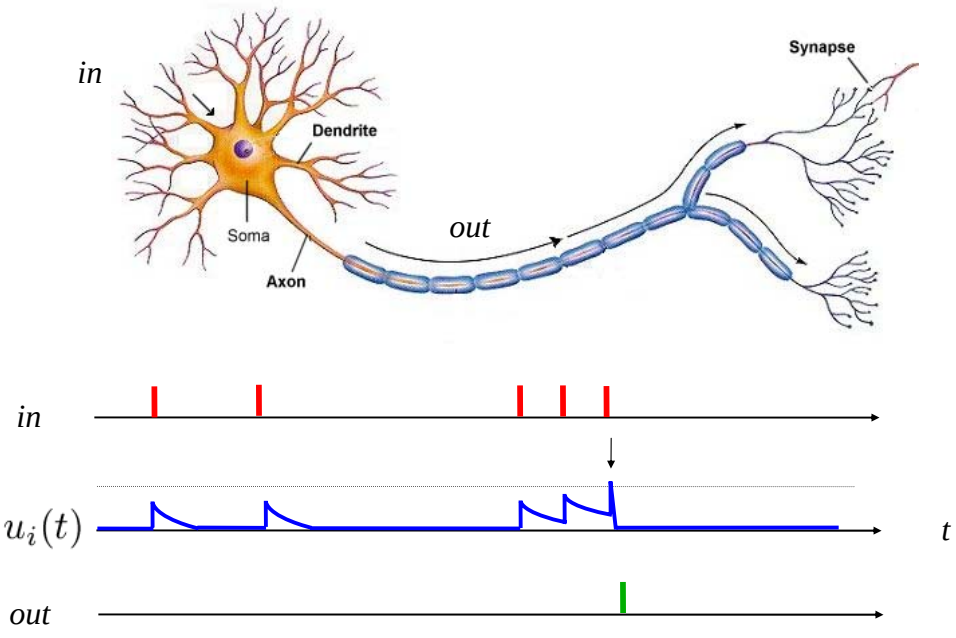
- Uno spike è rappresentato con un valore binario ad un certo tempo *t*.

- Uno spike incrementa il potenziale del neurone.

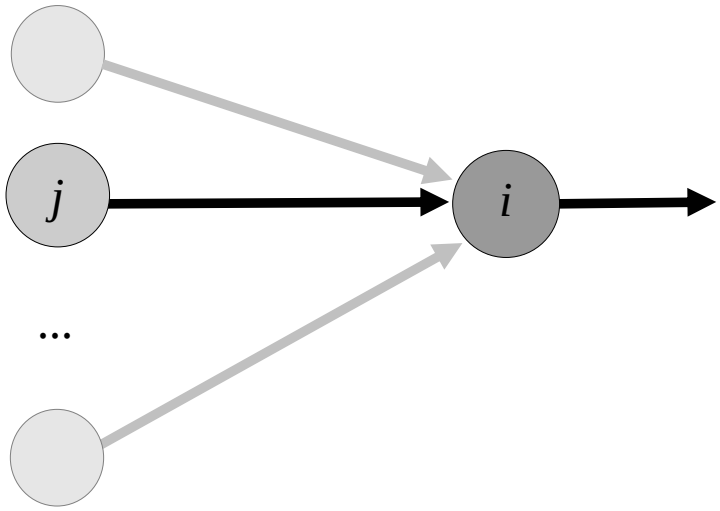
- Il potenziale decade nel tempo.

- Se il potenziale raggiunge una certa soglia, il neurone “spara”.

Spiking Neuron



Notazione:



Notazione:

$t_i^{(f)}$ istante in cui il neurone *i* ha generato lo spike *f*

$u_i(t)$ potenziale del neurone *i*

w_{ij} peso sinaptico tra i neuroni *j* e *i*

$$\mathcal{F}_i = \left\{ t_i^{(1)}, ..., t_i^{(n)} \right\}$$

$$\eta_i \left(t - t_i^{(f)} \right) \qquad \epsilon_{ij} \left(t - t_i^{(f)} \right)$$

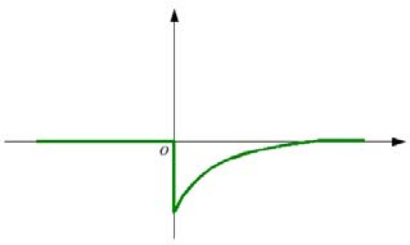
Potenziale (1)

$$u_i(t) = \sum_{t_i^{(f)} \in \mathcal{F}_i} \eta_i \left(t - t_i^{(f)} \right) + \sum_{j \in \Gamma_i} \sum_{t_j^{(f)} \in \mathcal{F}_j} w_{ij} \epsilon_{ij} \left(t - t_j^{(f)} \right)$$

Potenziale (2)

$$u_i(t) = \sum_{t_i^{(f)} \in \mathcal{F}_i} \eta_i \left(t - t_i^{(f)} \right) + \sum_{j \in \Gamma_i} \sum_{t_j^{(f)} \in \mathcal{F}_j} w_{ij} \epsilon_{ij} \left(t - t_j^{(f)} \right)$$

Refractory function

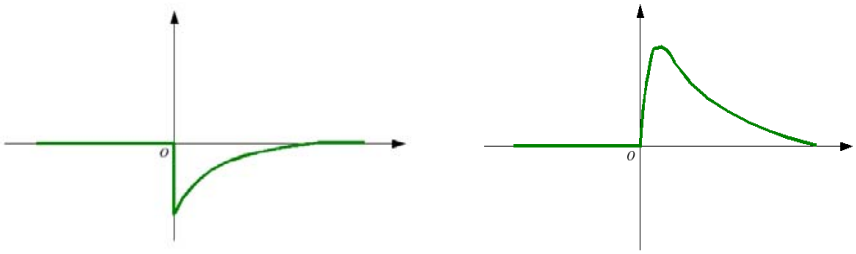


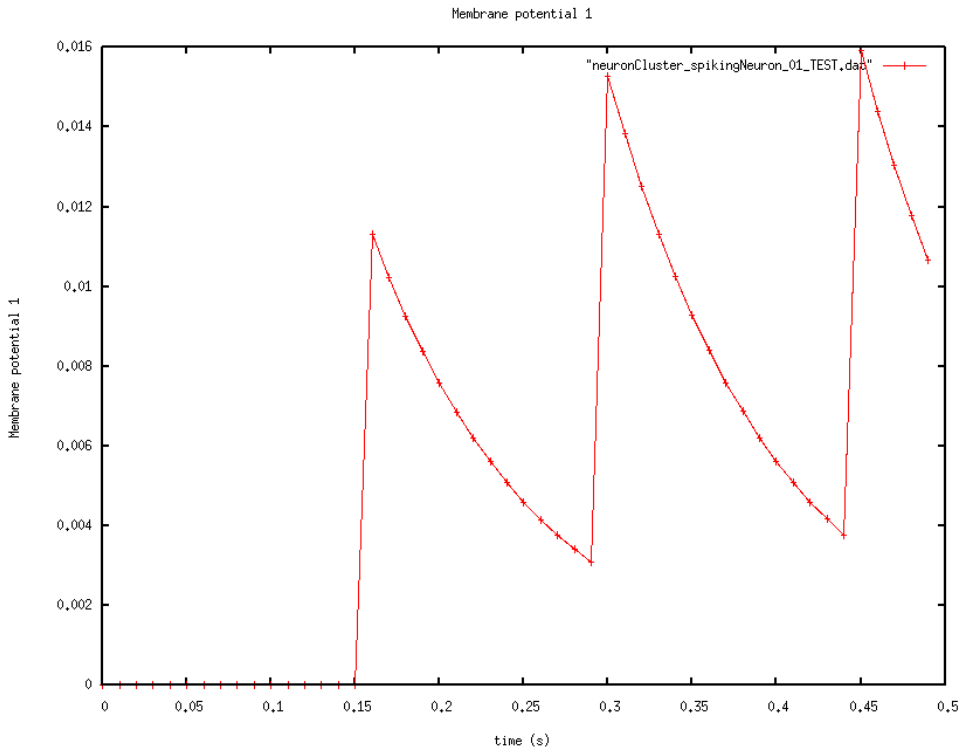
Potenziale (3)

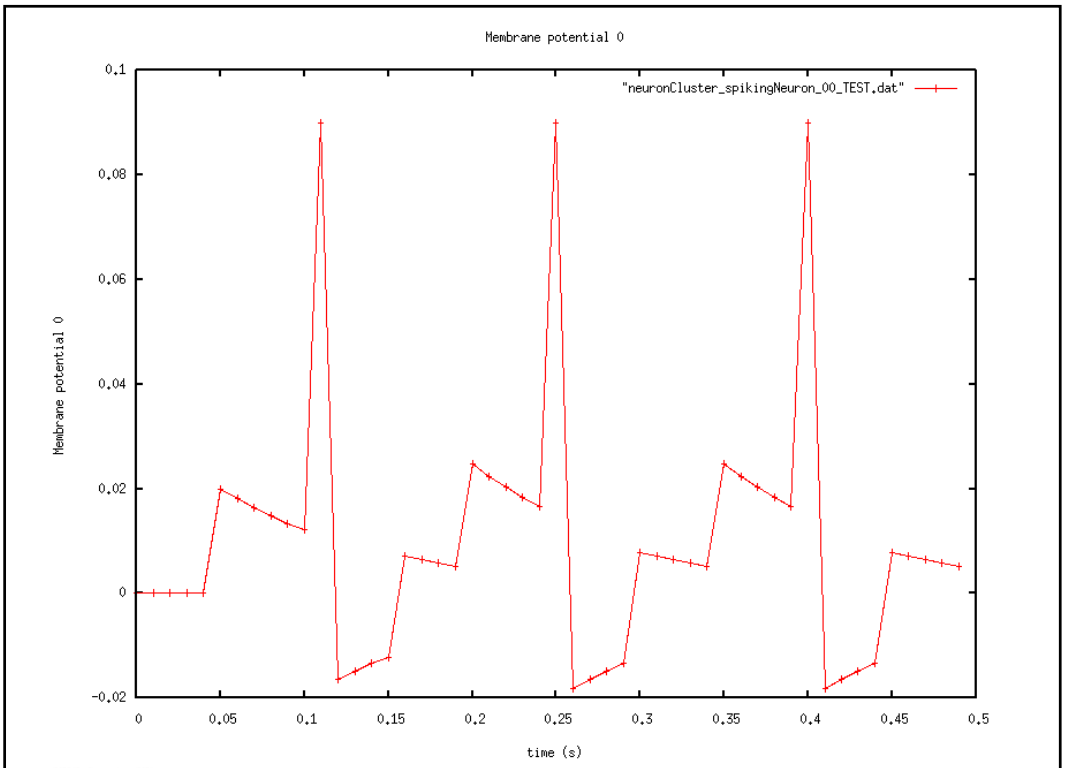
$$u_i(t) = \sum_{t_i^{(f)} \in \mathcal{F}_i} \eta_i \left(t - t_i^{(f)} \right) + \sum_{j \in \Gamma_i} \sum_{t_j^{(f)} \in \mathcal{F}_j} w_{ij} \epsilon_{ij} \left(t - t_j^{(f)} \right)$$

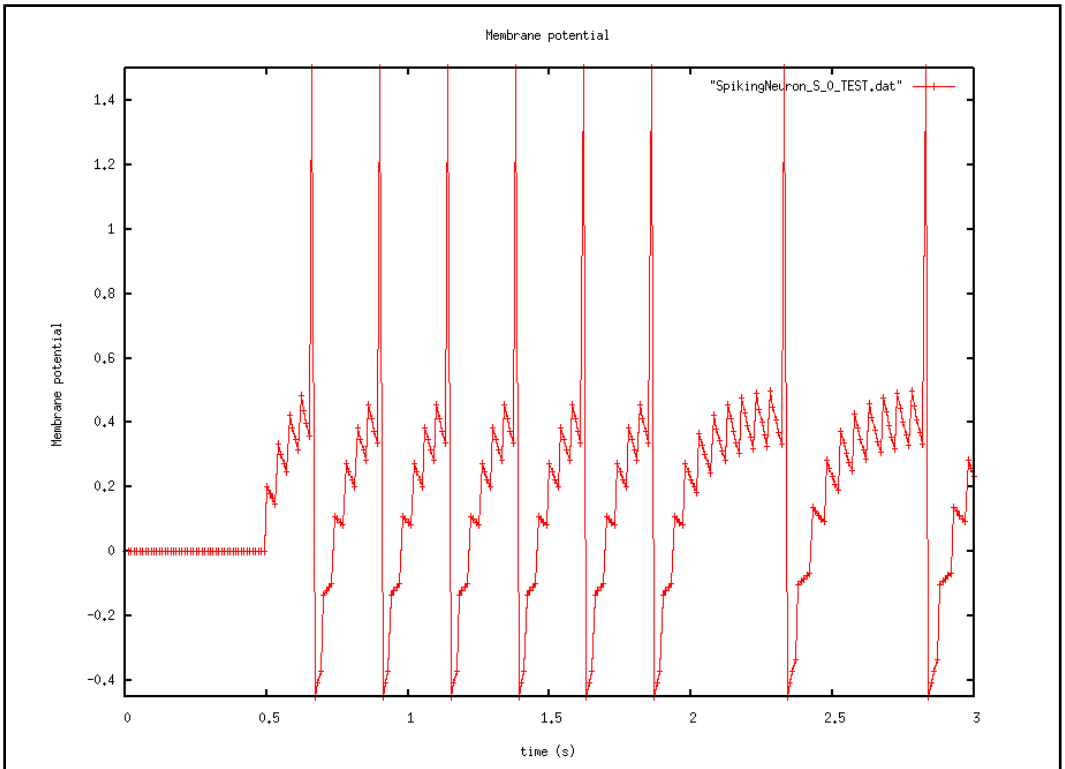
Refractory function

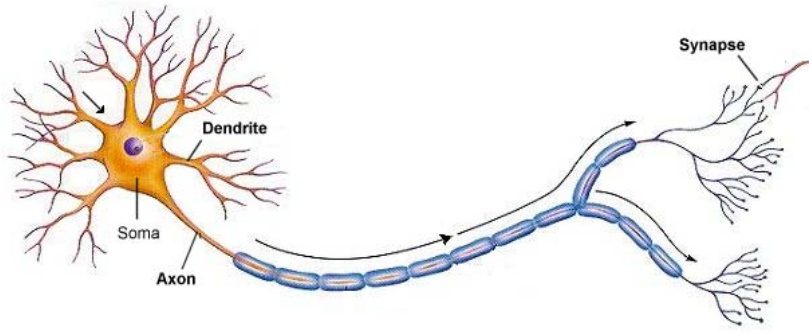
PSP

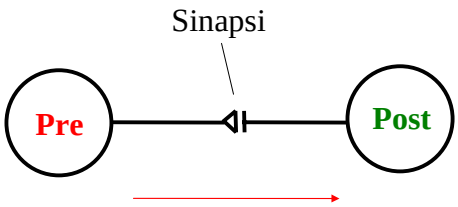


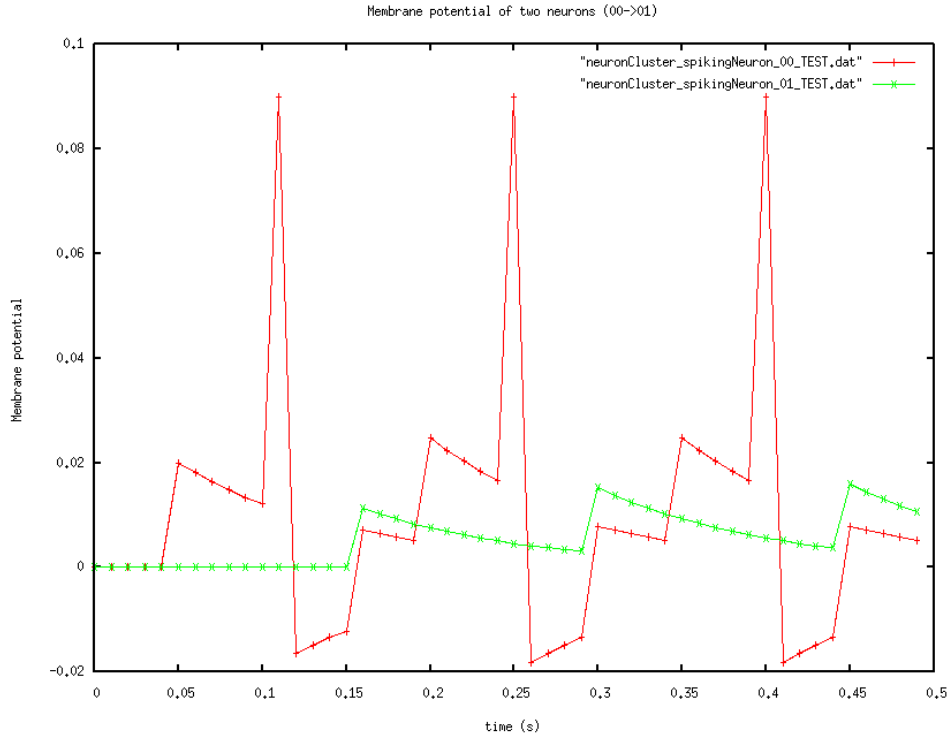



Membrane potential 0
"neuronCluster_spikingNeuron_00_TEST.dat"
Membrane potential 0
time (s)
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5

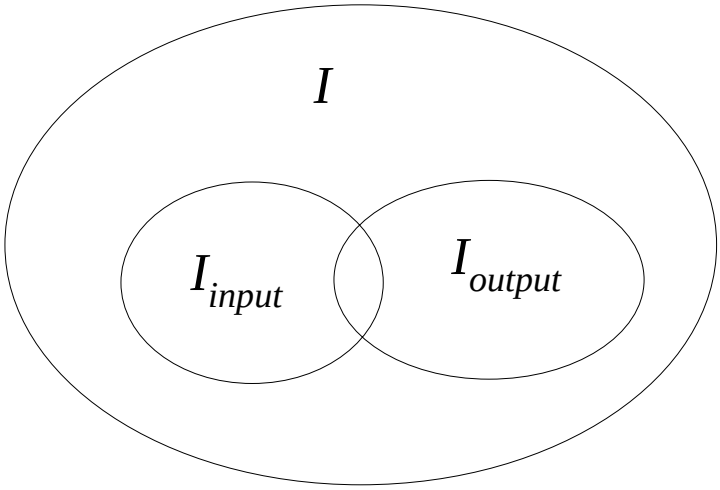

Membrane potential
"SpikingNeuron_S_0_TEST.dat"
Membrane potential
time (s)
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3


Synapse
Dendrite
Soma
Axon


Sinapsi
Pre
Post


Membrane potential of two neurons (00->01)
"neuronCluster_spikingNeuron_00_TEST.dat"
"neuronCluster_spikingNeuron_01_TEST.dat"
Membrane potential
time (s)
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
-0.02
0
0.05
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
0.5

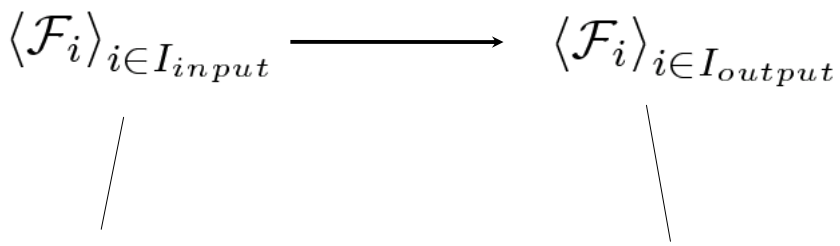
Rete di spiking neurons



Rete di spiking neurons

$$\langle \mathcal{F}_i \rangle_{i \in I_{input}} \longrightarrow \langle \mathcal{F}_i \rangle_{i \in I_{output}}$$

Rete di spiking neurons



Sequenza di spikes in ingresso

Sequenza di spikes in uscita

Apprendimento

Una possibile definizione: un sistema apprende quando, sulla base di segnali in ingresso, è in grado di modificare i suoi parametri interni per raggiungere un determinato “scopo”.

Tipi di apprendimento:

- **Supervisionato** *(cervelletto)*
- **Con rinforzo** *(gangli basali)*
- **Non supervisionato** *(corteccia)*

Apprendimento (1.1)

Modifica dei seguenti parametri:

Pesi sinaptici: w_{ij}

Soglia: $\vartheta \quad \vartheta_i$

Axonal transmission delays: Δ_{ij}

Apprendimento (1.2)

Modifica dei seguenti parametri:

Pesi sinaptici: w_{ij}

Soglia: $\vartheta \quad \vartheta_i$

Axonal transmission delays: Δ_{ij}

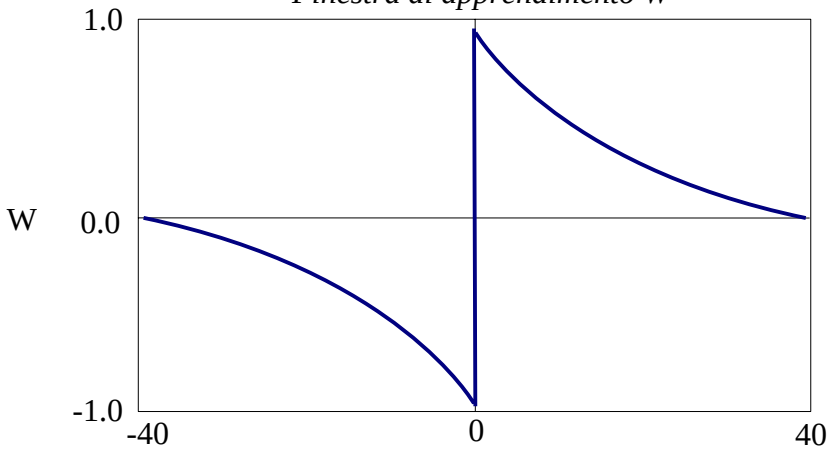
$$\left(t_i^{(f)} - t_j^{(f)}\right)$$

Apprendimento (2)

Phenomenon	Duration	Locus of Induction
Short-term Enhancement		
Paired-Pulse Facilitation (PPF)	100 ms	Pre
Augmentation	10 s	Pre
Post-tetanic potentiation	1 min	Pre
Long-term Enhancement		
Short-Term Potentiation (STP)	15 min	Post
Long-Term Potentiation (LTP)	>30 min	Pre and Post
Depression		
Paired-Pulse Depression (PPD)	100 ms	Pre
Depletion	10 s	Pre
Long-term Depression (LTD)	>30 min	Pre and Post

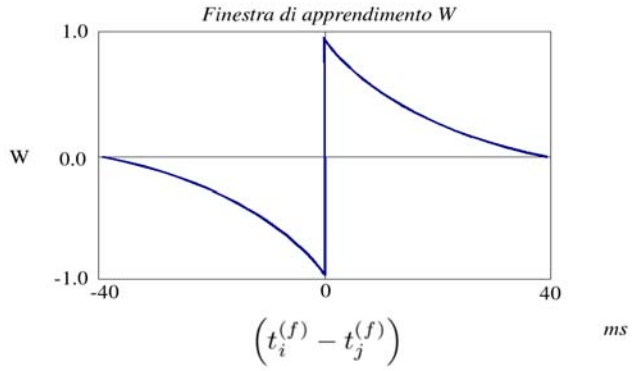
Apprendimento (2.1)

Finestra di apprendimento W



Apprendimento (2.2)

$$\triangle w_{ij} = W\left(t_i^{(f)} - t_j^{(f)}\right)$$



(Potenziamento e depressione a lungo termine)

Apprendimento (3)

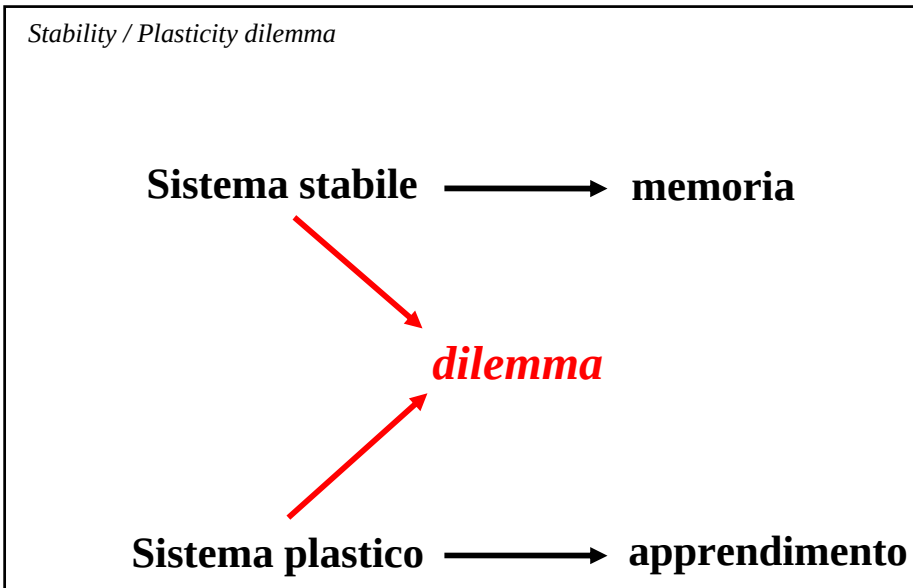
Stability / Plasticity dilemma

Stability / Plasticity dilemma

Sistema stabile → **memoria**

Sistema plastico → **apprendimento**

Stability / Plasticity dilemma



Spiking Neurons - Pietro Mele 2004 - pietromele@yahoo.com

Stability / Plasticity dilemma

Sistema stabile → **memoria**

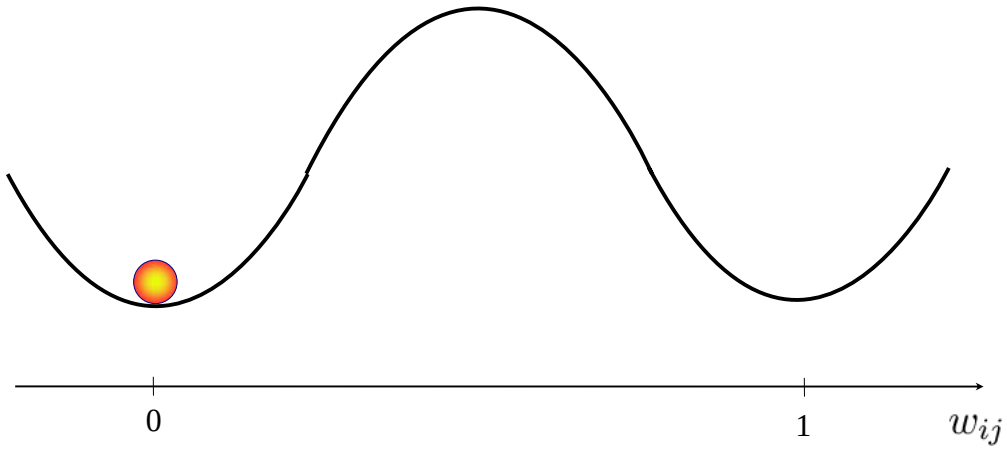
dilemma

Come puo' un sistema essere stabile e plastico contemporaneamente?

Sistema plastico → **apprendimento**

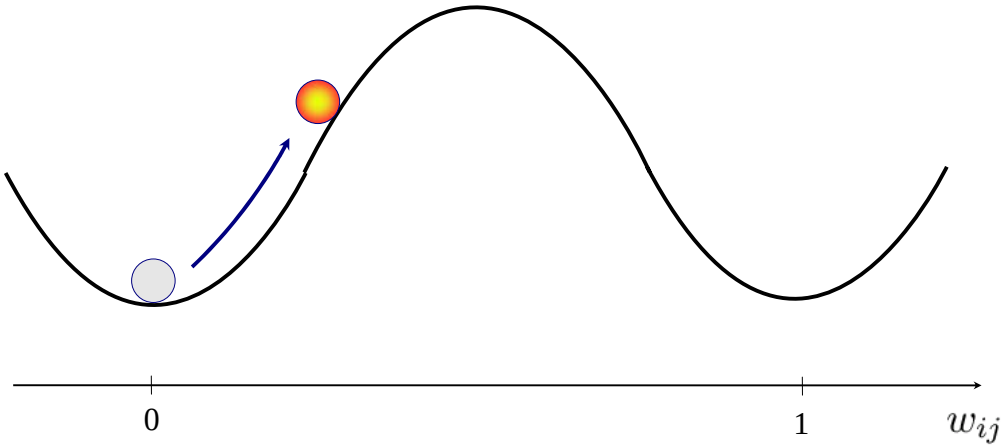
Apprendimento (3.1)

Lo stato di un sistema "pseudo-binario":



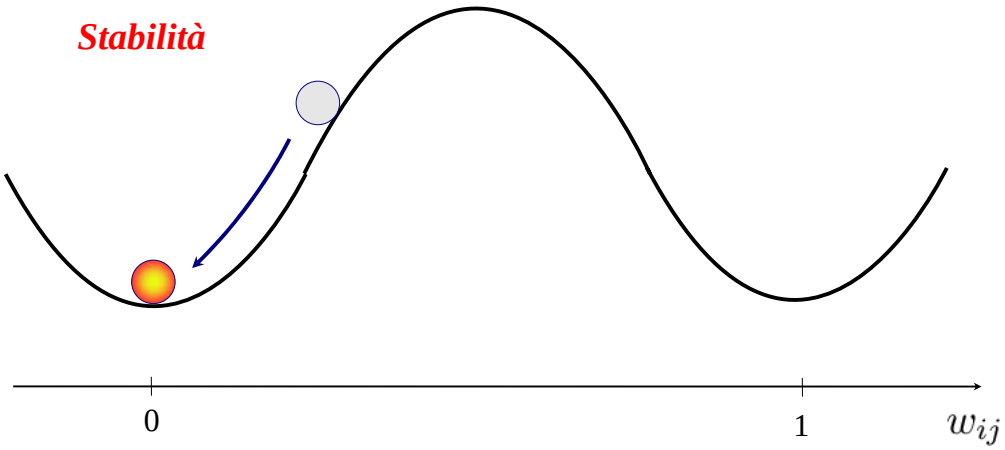
Apprendimento (3.2)

Un sistema "perturbato":

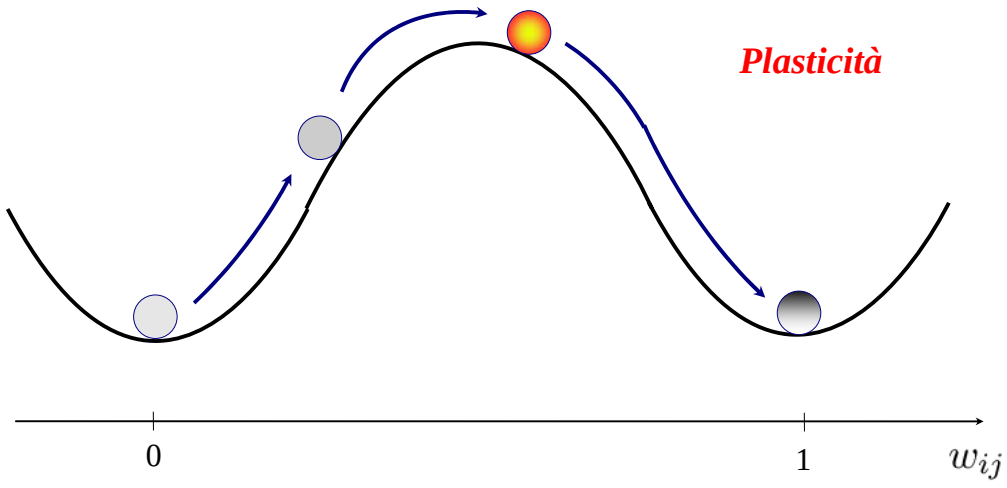


Apprendimento (3.3)

Stabilità



Apprendimento (3.4)



Fine