



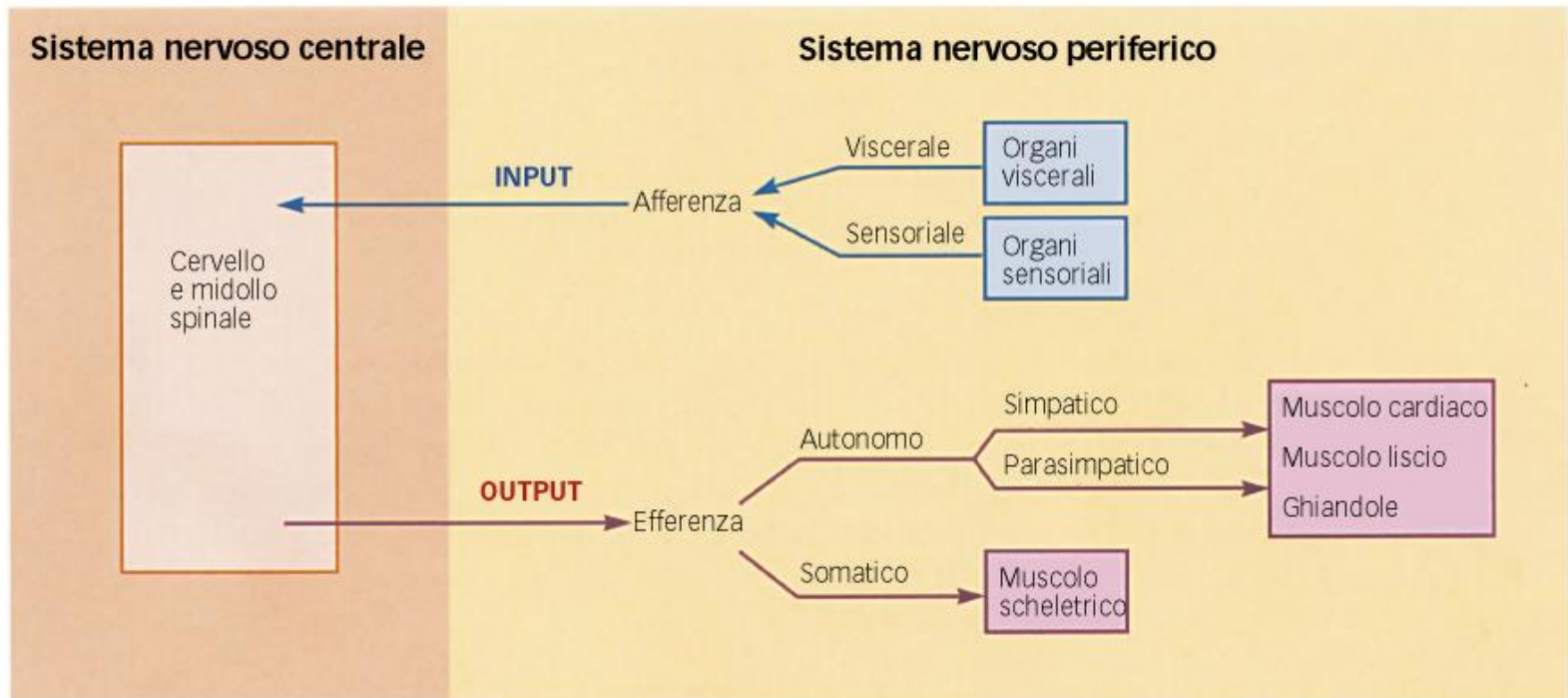
Prof.ssa Iole Tomassini Barbarossa

Corso di Laurea Magistrale in  
Neuropsicobiologia

Lezioni di Fisiologia sensoriale

E' vietata la copia e la riproduzione dei contenuti e immagini in qualsiasi forma.

E' inoltre vietata la redistribuzione e la pubblicazione dei contenuti e immagini non autorizzate espressamente dall'autore.

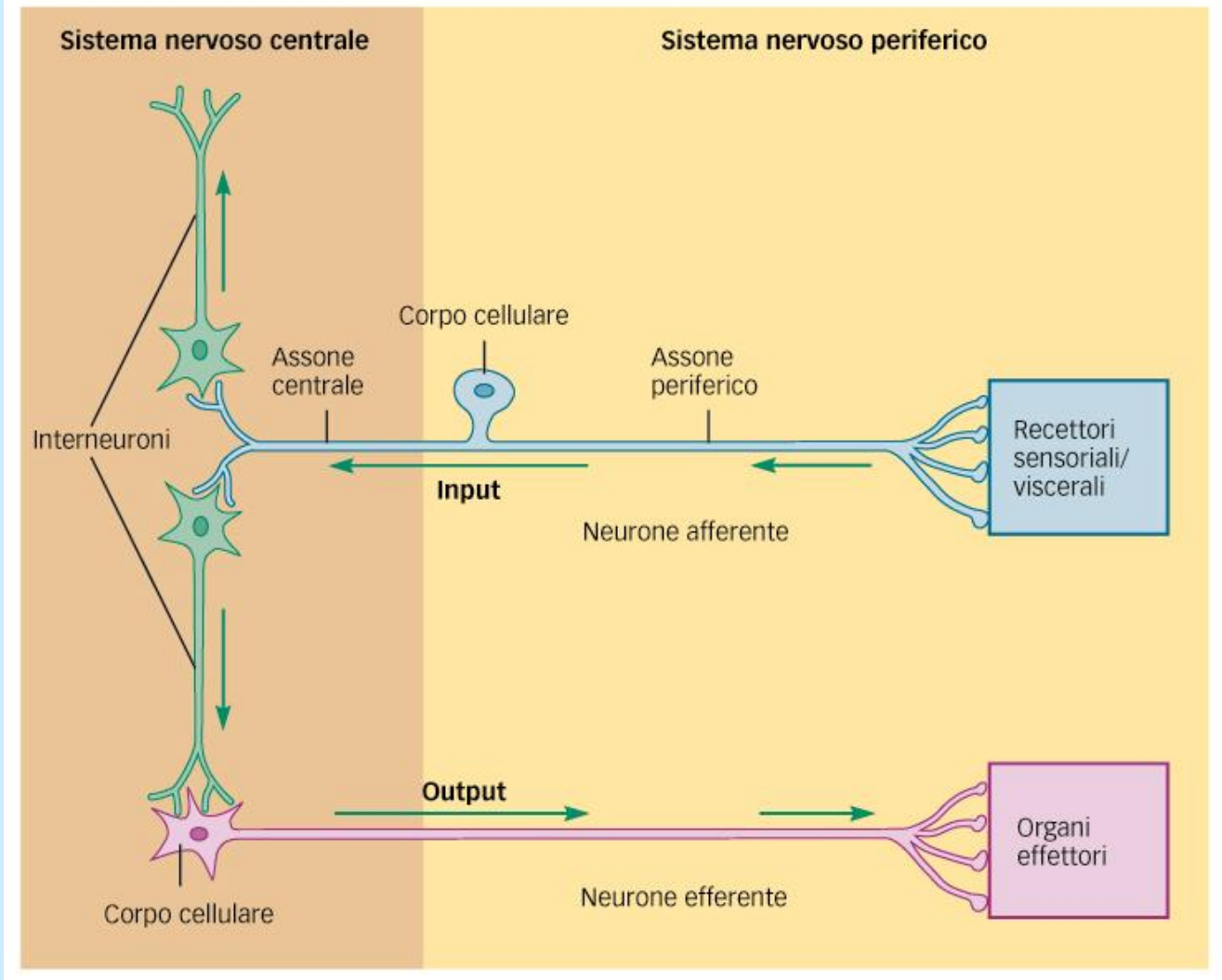


**Il sistema nervoso è una struttura organizzata funzionalmente per:**

**ricevere** (*sistema nervoso periferico*)

**conservare e elaborare** (*sistema nervoso centrale*) —————> **informazioni**

**trasmettere** (*sistema nervoso periferico*)



**Il sistema nervoso è una struttura organizzata funzionalmente per:**

**ricevere** (*sistema nervoso periferico*)

**conservare e elaborare** (*sistema nervoso centrale*)

**informazionitrasmettere** (*sistema nervoso periferico*)

**La sensazione** è un processo cognitivo che richiede l'impegno totale da parte del SNC

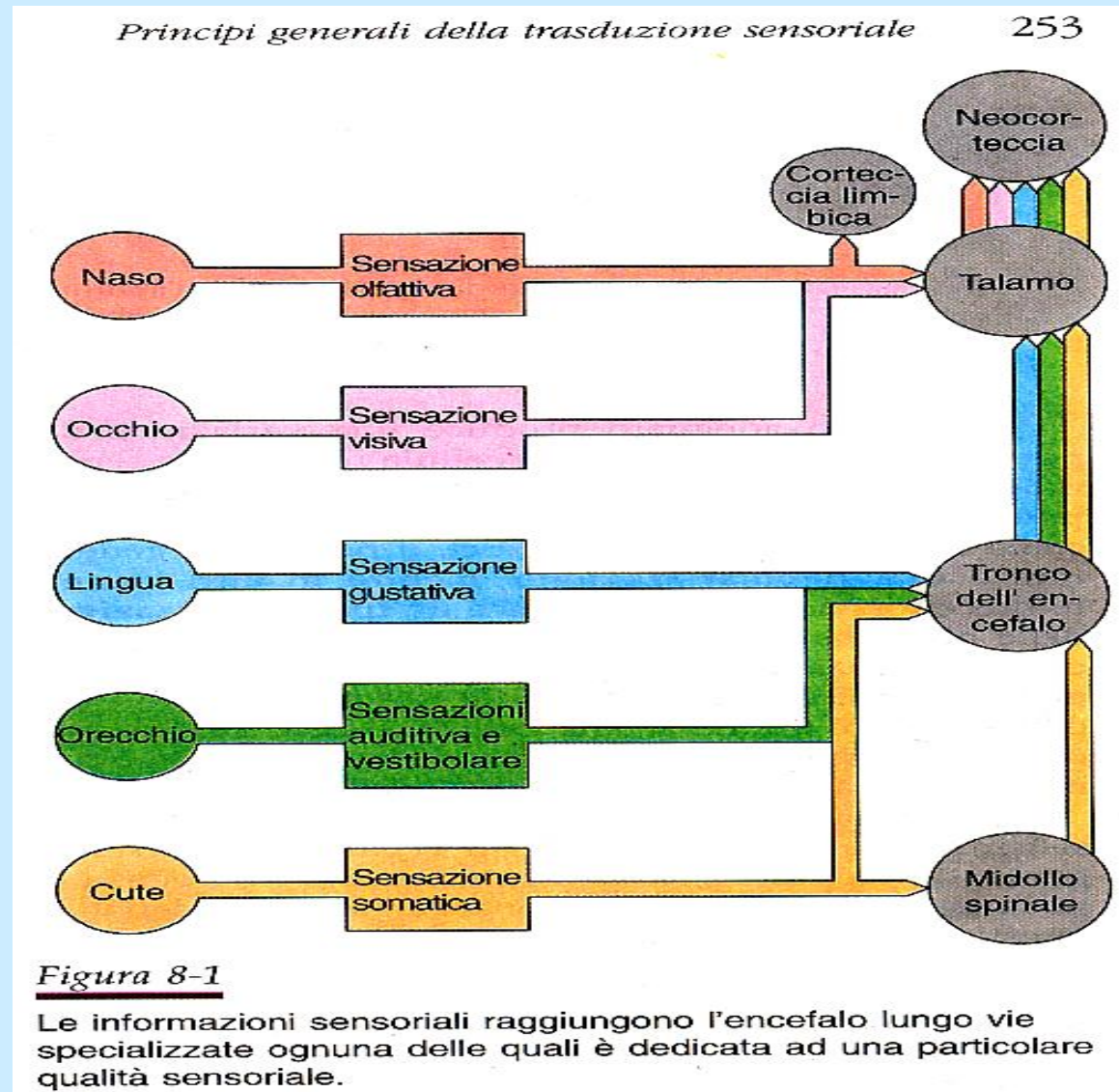
**Le modalità sensoriali:**

- vista, udito, tatto, olfatto e gusto
- dolore, equilibrio, postura e percezione del movimento
- Altri sistemi sensoriali complessi di cui non si è coscienti controllano l'ambiente interno e metabolico del corpo

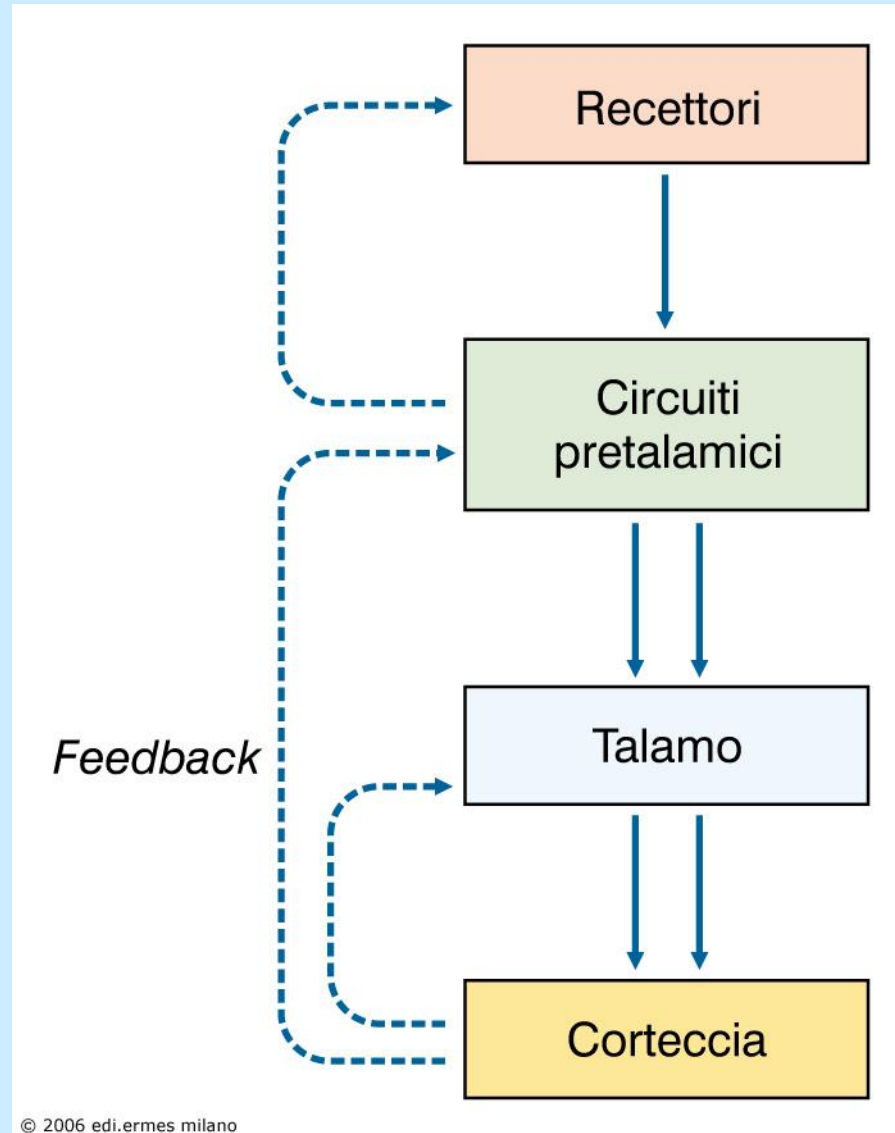
# Teoria delle vie etichettate

Il recettore sensoriale e i relativi circuiti neuronali non sanno ciò che li ha stimolati, il tipo di risposta è la stessa: proprietà della **UNIVARIANZA**

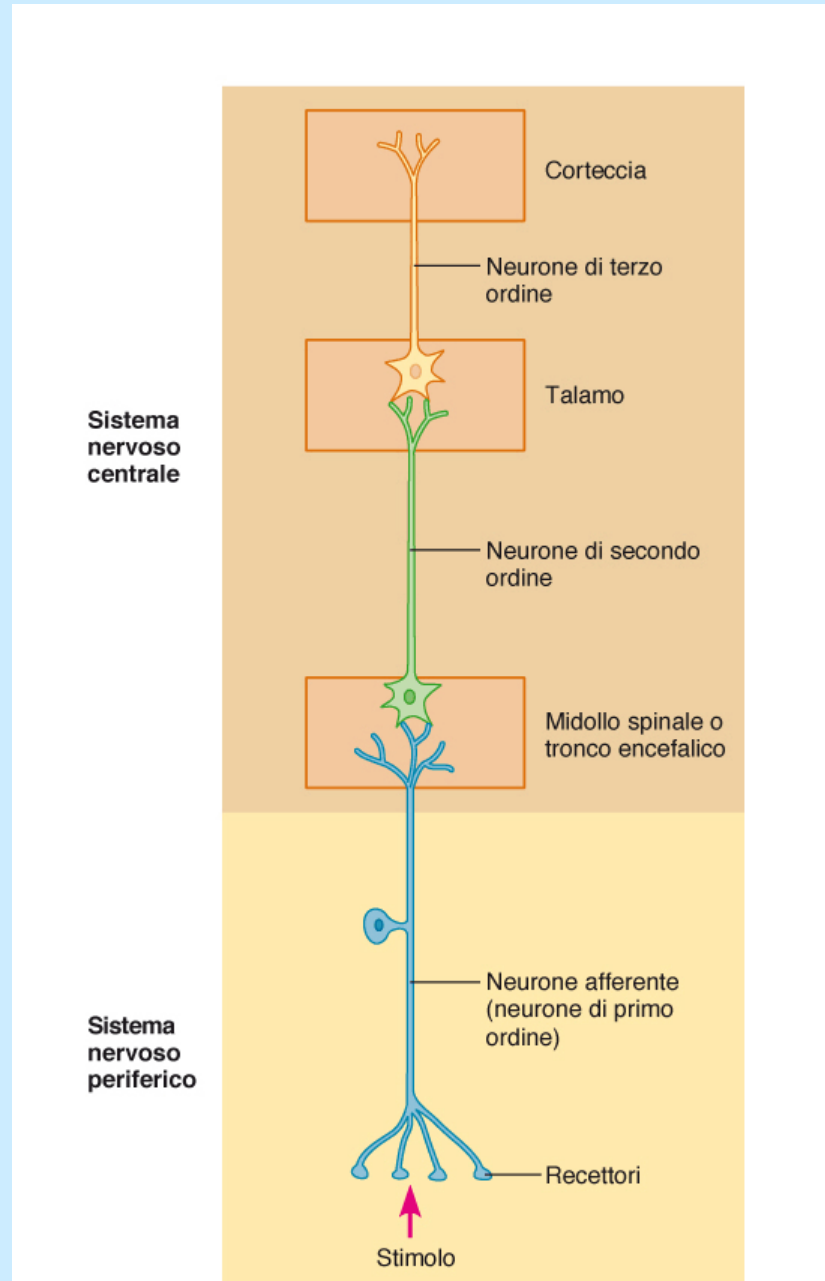
La specificità di ogni modalità è garantita dalla struttura e dalla posizione del recettore

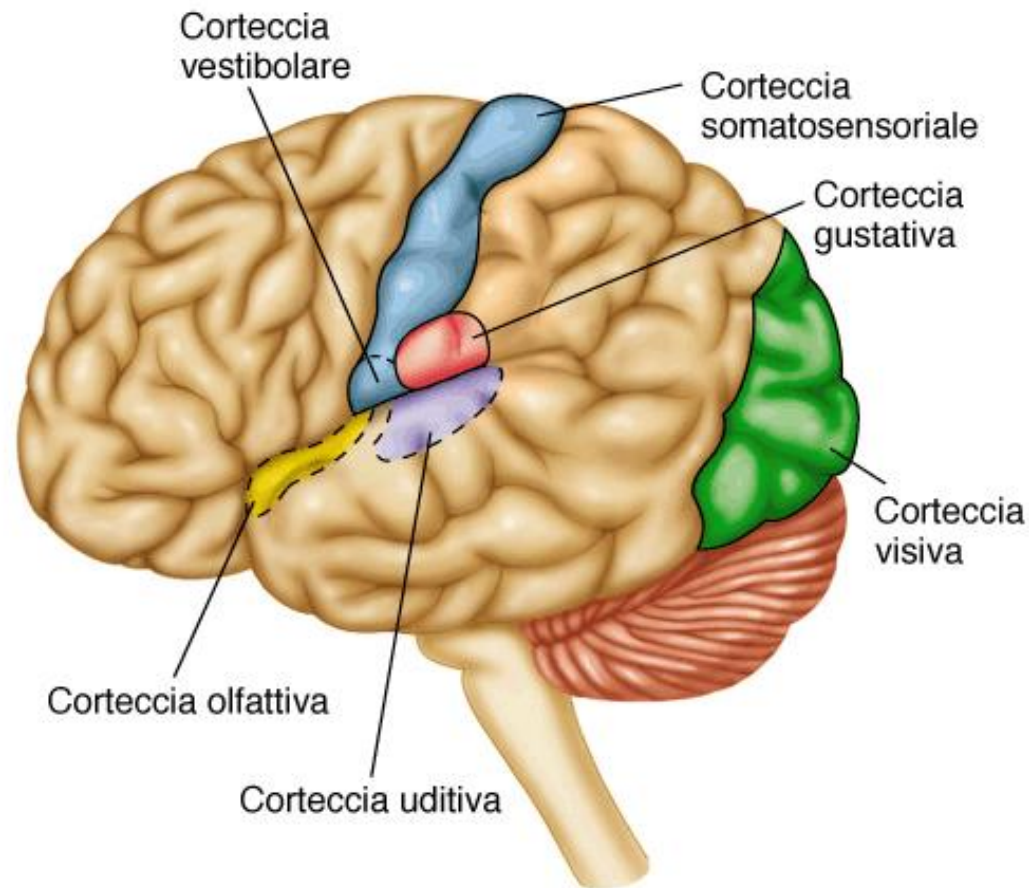


# Vie sensitive



# Vie sensitive





**FIGURA 10.4 Aree sensoriali della corteccia cerebrale.** La corteccia vestibolare in realtà è situata nel lobo parietale, inferiormente alla corteccia somatosensoriale. La corteccia uditiva è situata sul lato interno del lobo temporale e la corteccia olfattiva sulla superficie inferiore dello stesso lobo.

# I recettori di senso

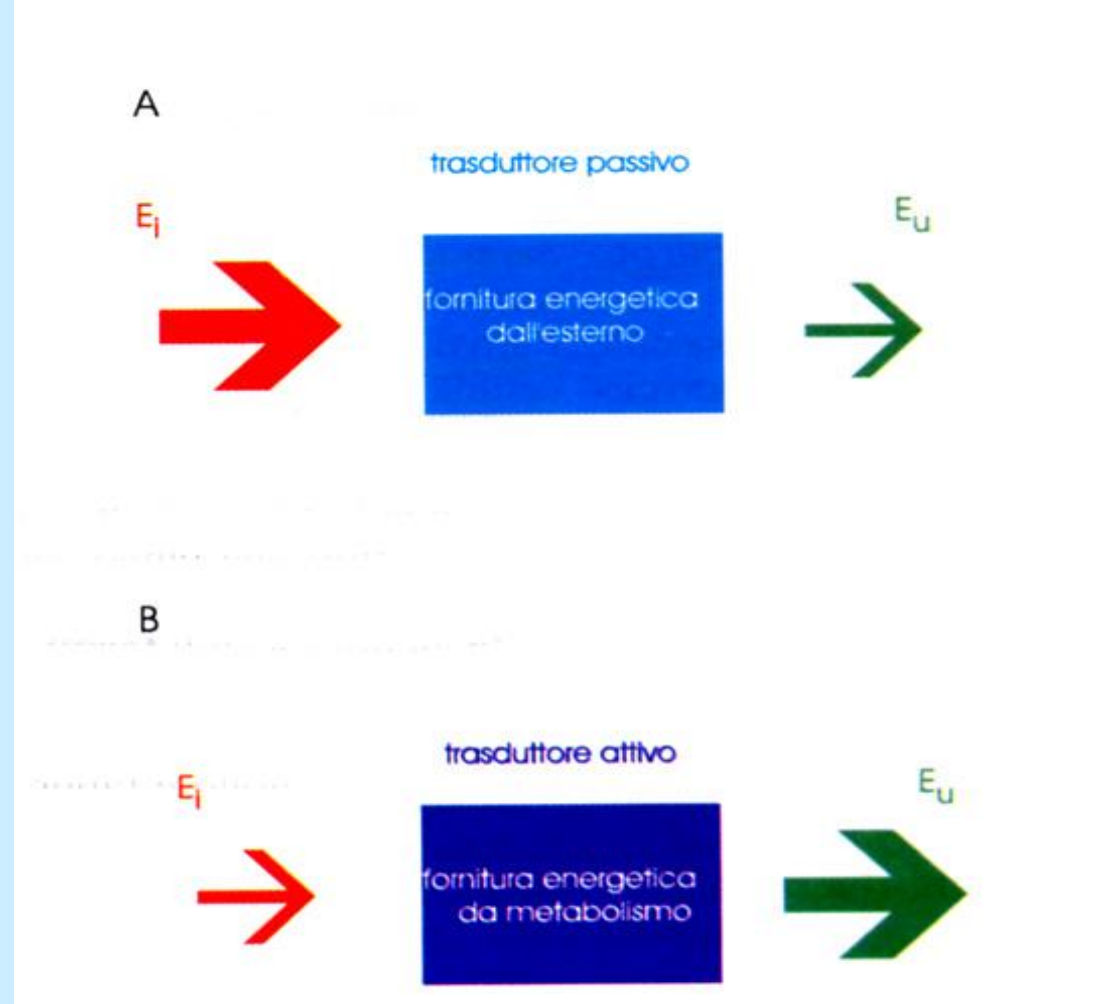
- I recettori sensoriali rappresentano i soli canali di comunicazione tra il mondo esterno e il sistema nervoso.
- Gli stimoli sensoriali interagiscono con l'organizzazione e le proprietà del sistema nervoso, ereditate geneticamente, e in tal modo forniscono all'animale tutto il patrimonio delle sue conoscenze.

*“Nulla vi è nella mente che non passi attraverso i sensi”.*

- I recettori di senso sono strutture eccitabili specializzate, capaci di rilevare forme specifiche di energia presenti nell'ambiente circostante, cioè gli stimoli, e trasformarne il contenuto informativo in segnali elettrici che rappresentano l'input sensoriale per il sistema nervoso centrale.
- La percezione degli stimoli non è assoluta

**I recettori sensoriali**, dal punto di vista funzionale sono tutti definibili come **trasduttori**.

In fisica viene definito un trasduttore l'elemento capace di trasformare una forma di energia in un'altra.

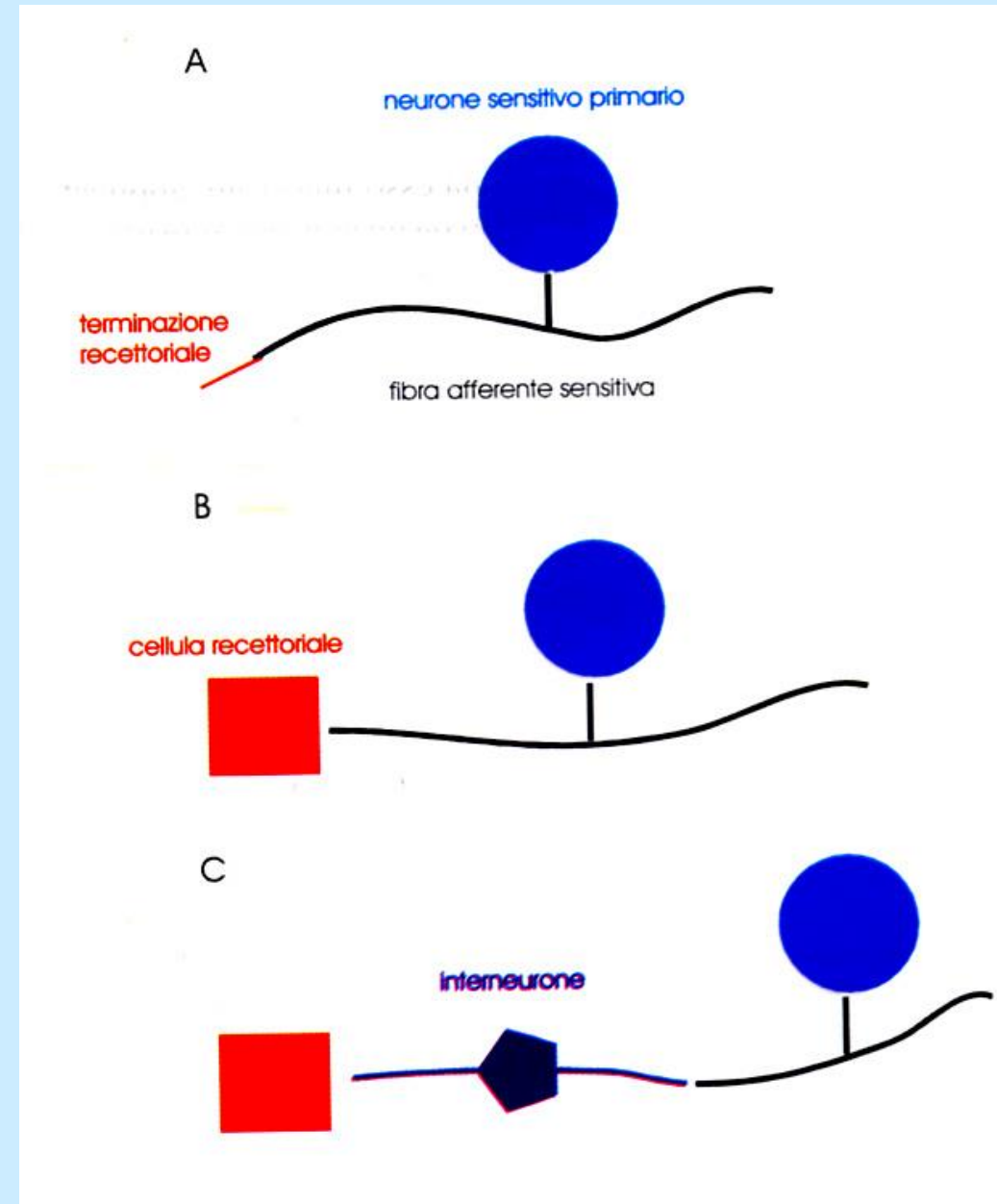


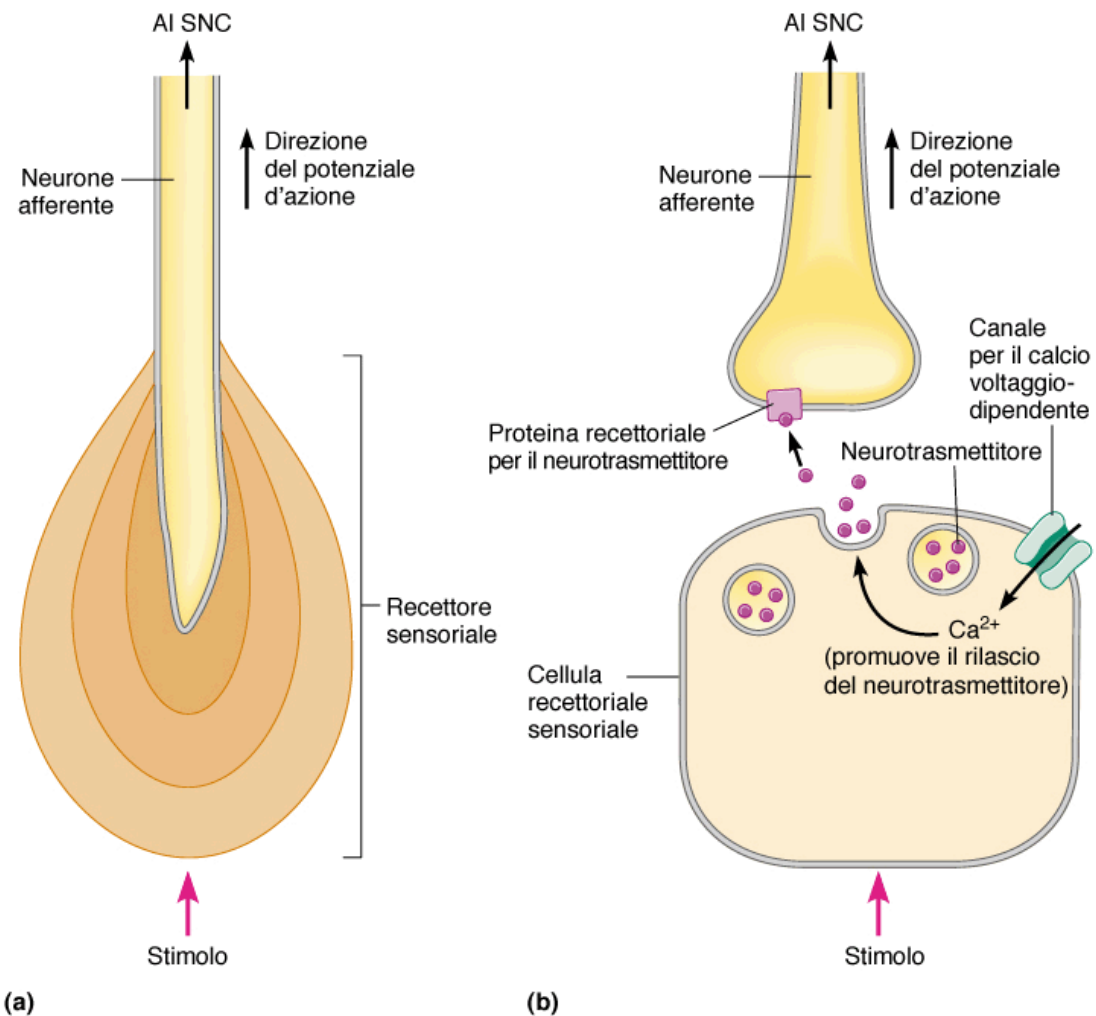
I recettori sensoriali funzionano da trasduttori attivi grazie al fatto che dispongono di un'energia propria, derivante dal metabolismo cellulare, che consente loro di mantenere un proprio potenziale di riposo sul quale si iscrive l'azione dello stimolo.

# Classificazione

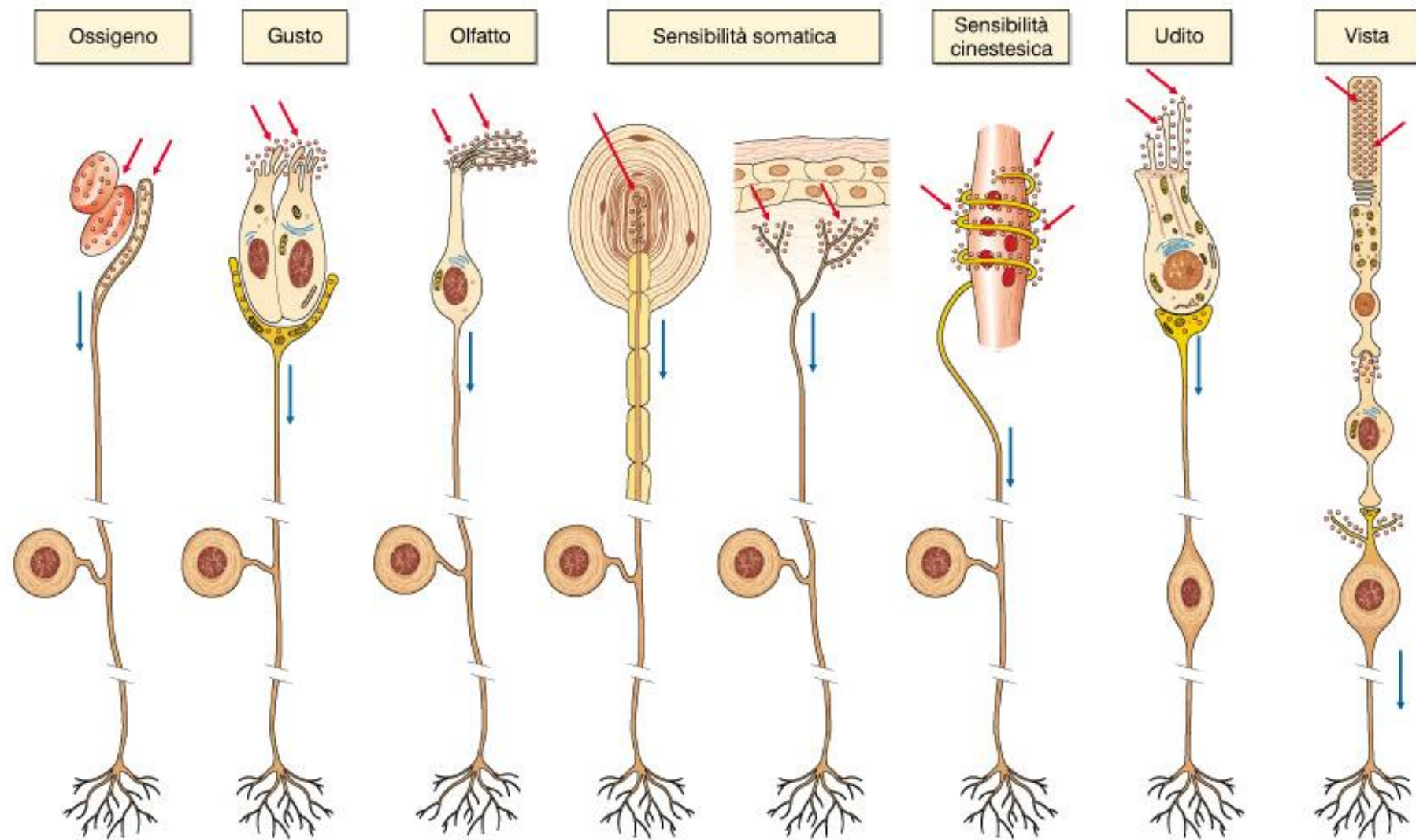
I recettori sensoriali si possono classificare:

- In base **al tipo di energia** che specificamente li attiva
- In base **alla loro localizzazione** nel corpo dell'individuo
- In base **al tipo di sensazione** che nasce dalla loro stimolazione
- In base **alle loro caratteristiche morfologiche**



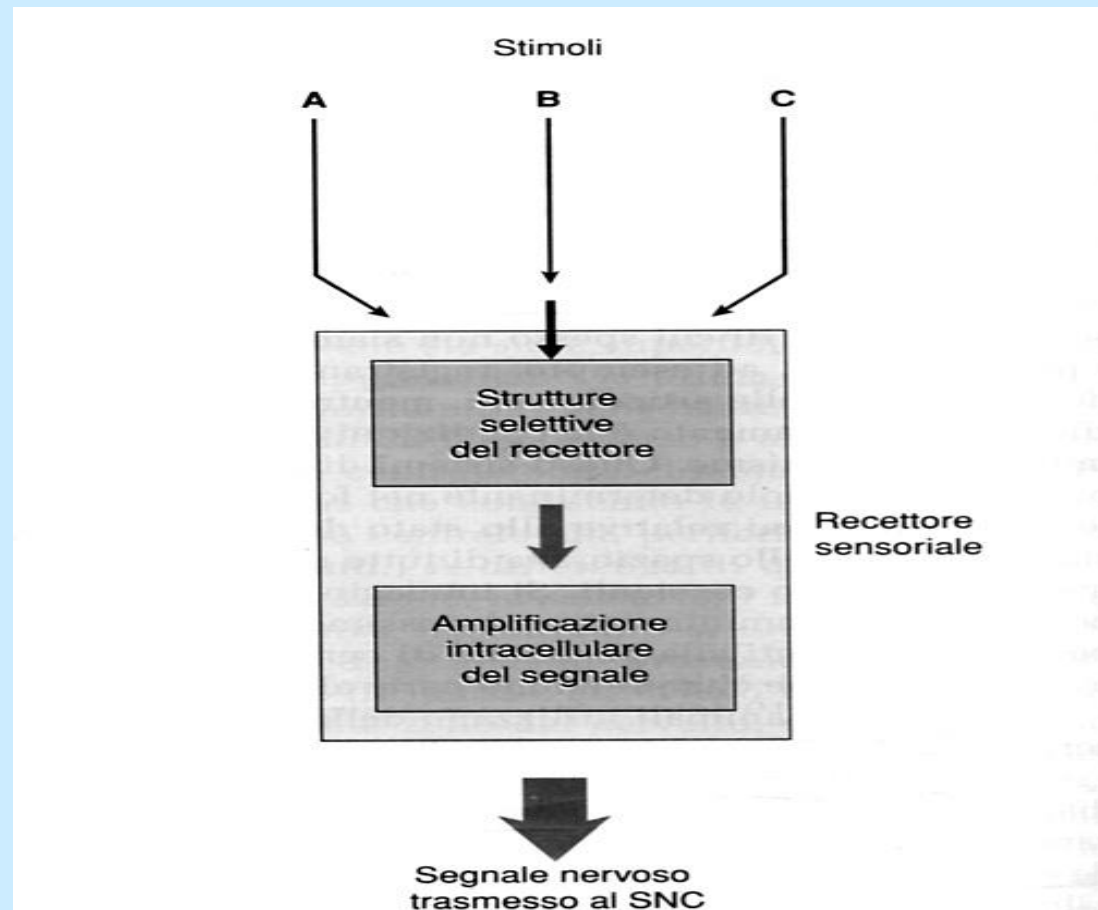


**FIGURA 10.2 Struttura e funzione dei recettori sensoriali.** (a) Recettore sensoriale costituito dalla terminazione specializzata di un neurone afferente. Lo stimolo agisce sul recettore sensoriale aprendo o chiudendo canali ionici, producendo in tal modo un potenziale di recettore. (b) Recettore sensoriale costituito da una cellula separata dal neurone afferente. Lo stimolo cambia il potenziale di membrana della cellula recettoriale e ciò apre (o chiude) canali per il calcio, aumentando (o riducendo) la concentrazione citoplasmatica di calcio. Le modificazioni della concentrazione di calcio facilitano (o inibiscono) il rilascio di neurotrasmettitore per esocitosi. Il neurotrasmettitore comunica con il neurone afferente legandosi ai recettori della terminazione afferente e inducendo un potenziale graduato.



# Percezione sensoriale

I recettori sensoriali sono **selettivi** per un determinato tipo di stimolo. Cioè sono capaci di essere attivati con quantità minime di energia solo dallo stimolo a cui sono specificamente sensibili.



**Tutti i recettori sensoriali** realizzano le stesse operazioni fondamentali:

**ricezione**

**amplificazione**

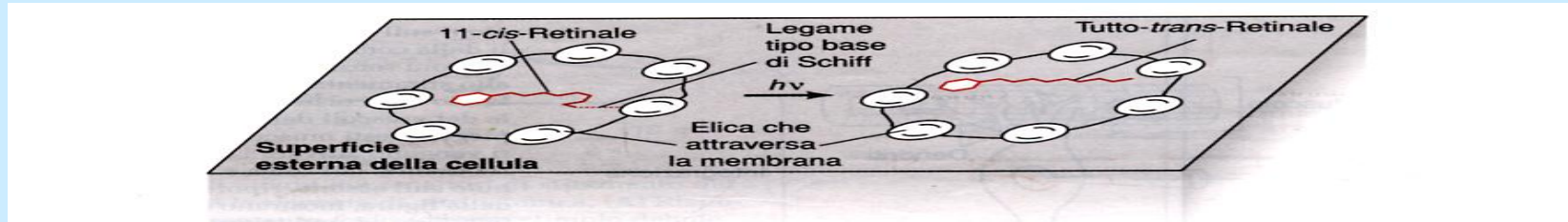
**trasduzione**

**trasmissione o codificazione**

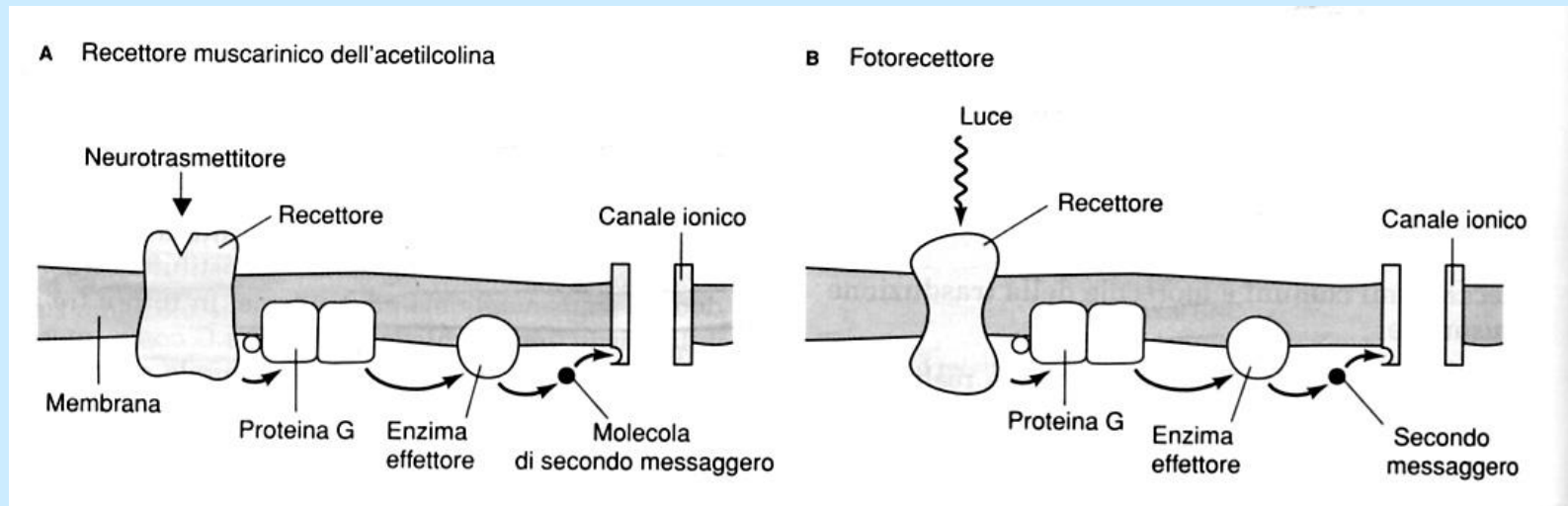
# La ricezione sensoriale

- L'evento iniziale della trasduzione sensoriale è la **ricezione**, e si definisce soglia di ricezione la quantità minima di energia contenuta nello stimolo capace di attivare il 50% delle volte un recettore sensoriale.
- Molti recettori sono capaci di captare stimoli la cui quantità di energia è molto prossima al limite teorico: fotocettori sono attivabili da singoli quanti, le cellule cigliate sono attivate da spostamenti di dimensione uguali al diametro di un atomo di H
- La ricezione selettiva per un determinato tipo di stimolo implica l'esistenza, nelle membrane o in strutture ad esse associate di molecole capaci di captare la forma specifica di energia.

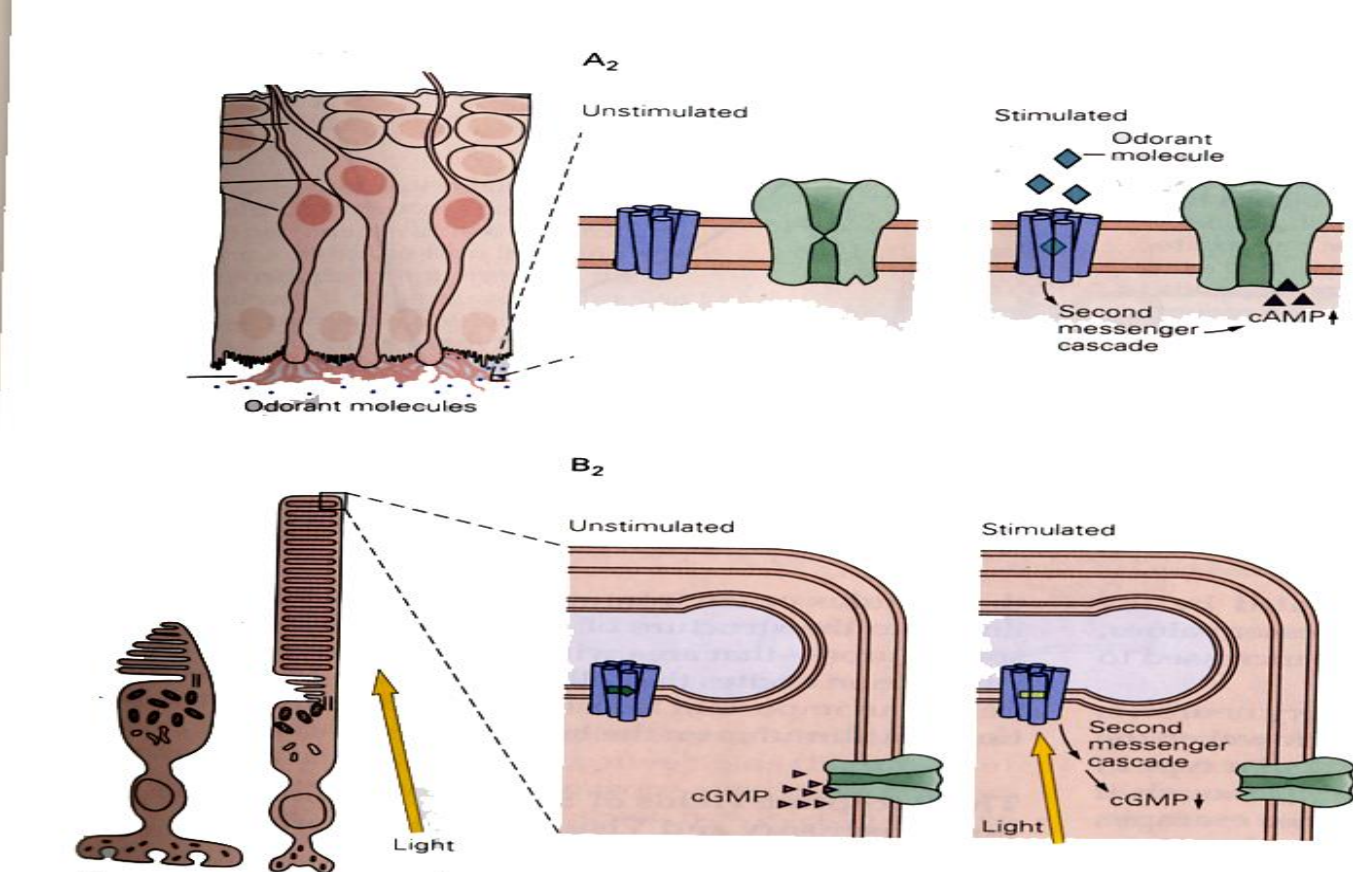
Dati recenti indicano che nelle membrane dei recettori di tre dei sensi tipici dei vertebrati - la vista, l'olfatto e la recezione del dolce e dell'amaro – sono presenti delle proteine con un'analogia strutturale.



in tutti e tre i casi la trasduzione richiede le proteine G come intermedi.



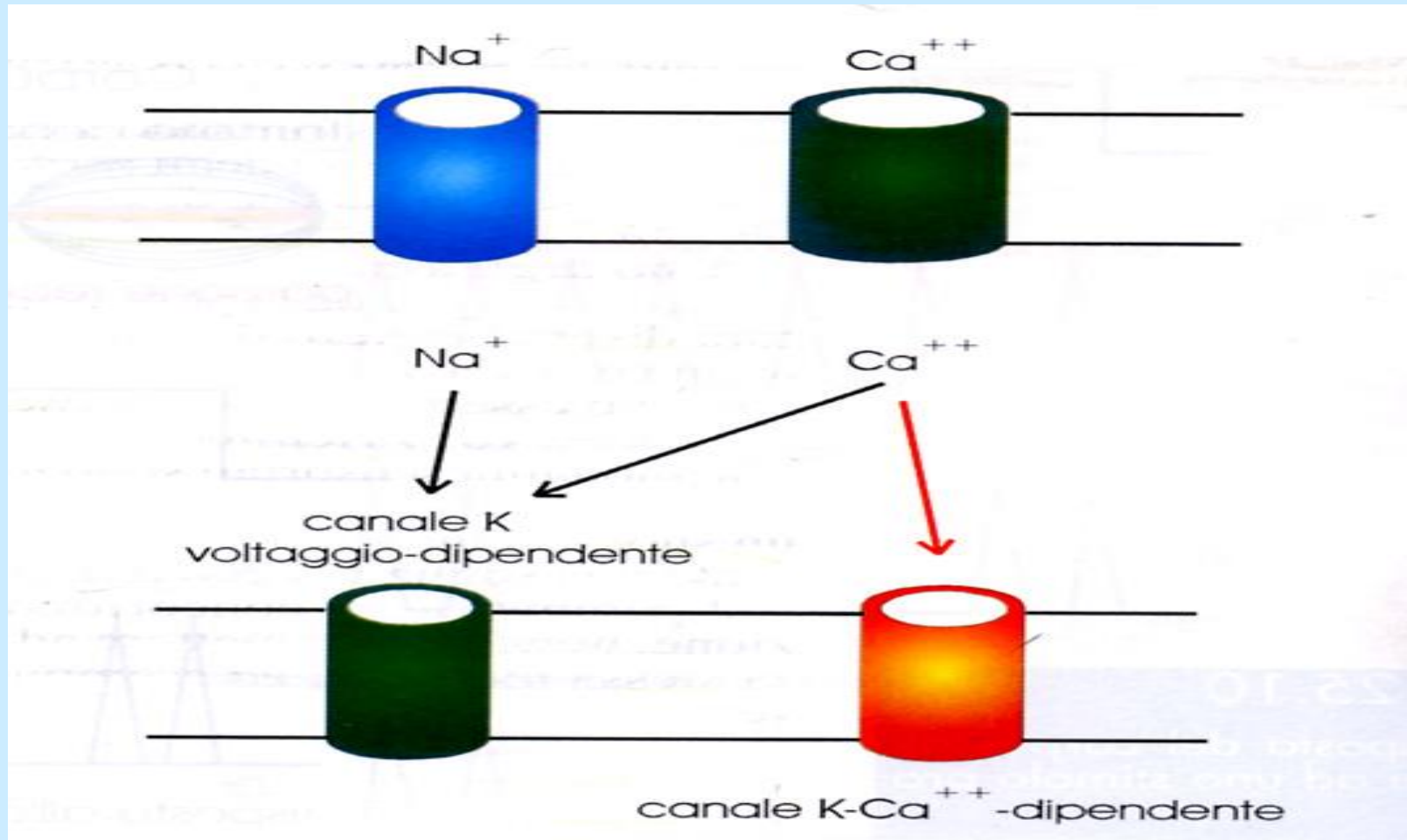
- La ricezione tramite attivazione di G proteine implica l'attivazione di una cascata di secondi messaggeri che determina amplificazione della risposta.
- esempio efficace: Un fotone di luce contiene circa  $3 \times 10^{-19}$  j di energia radiante; un fotorecettore attivato da un singolo fotone produce una corrente di recettore di circa  $5 \times 10^{-14}$  j di energia elettrica.



# Trasduzione

- Il primo degli eventi bioelettrici attivati nel recettore dalla stimolazione è rappresentato dal potenziale del recettore.
- Tale potenziale di recettore è prodotto dal movimento trans-membranale di ioni conseguente alle variazioni di permeabilità dovute all'apertura o chiusura, **stimolo dipendente di canali ionici** che fino a non molti anni fa, si ritenevano non selettivi, cioè che lasciavano passare sia  $\text{Na}^+$  che  $\text{K}^+$ .

E' stato dimostrato recentemente che, in alcuni casi, si aprono canali al  $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^{++}$  che determinano depolarizzazione. La fuoriuscita del  $\text{K}^+$  avverrebbe in un secondo momento per apertura di canali voltaggio dipendenti.



# Meccanismi di trasduzione del segnale

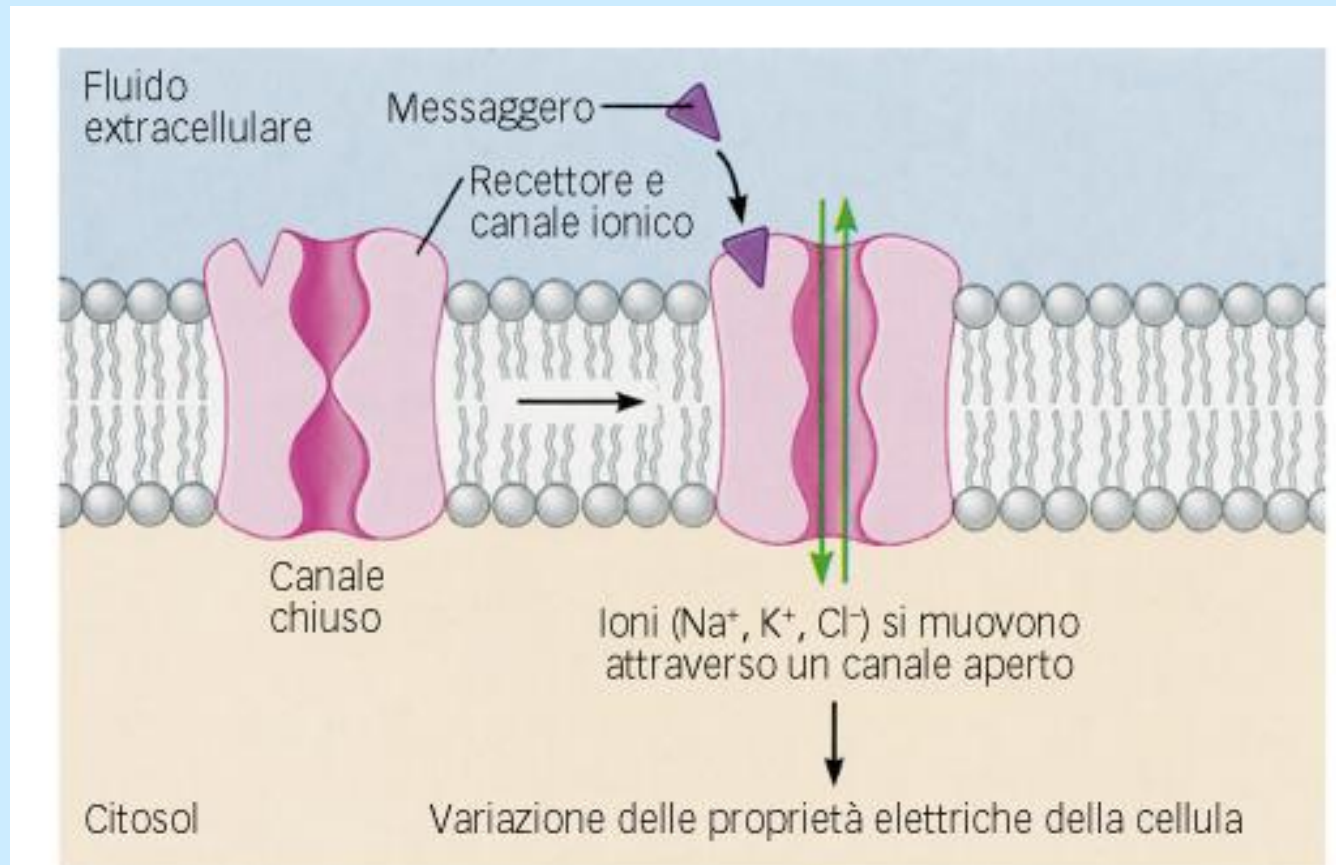
**Recettori-canale**

**Recettori–proteine G**

# Recettori-canale

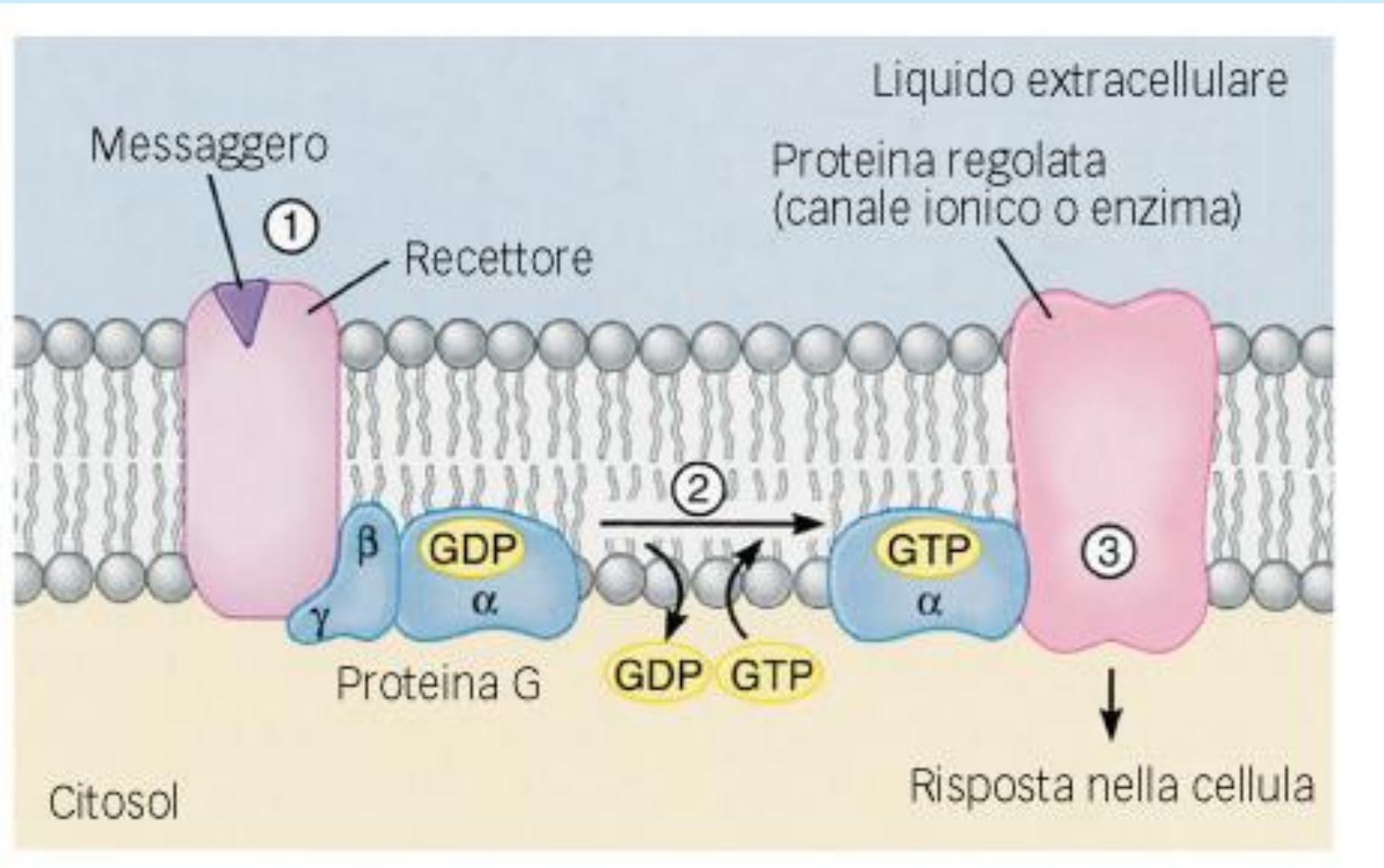
Canali rapidi attivati dal ligando: recettore e canale = stessa proteina

a) L'apertura del canale produce un flusso ionico che determina una variazione del potenziale di membrana

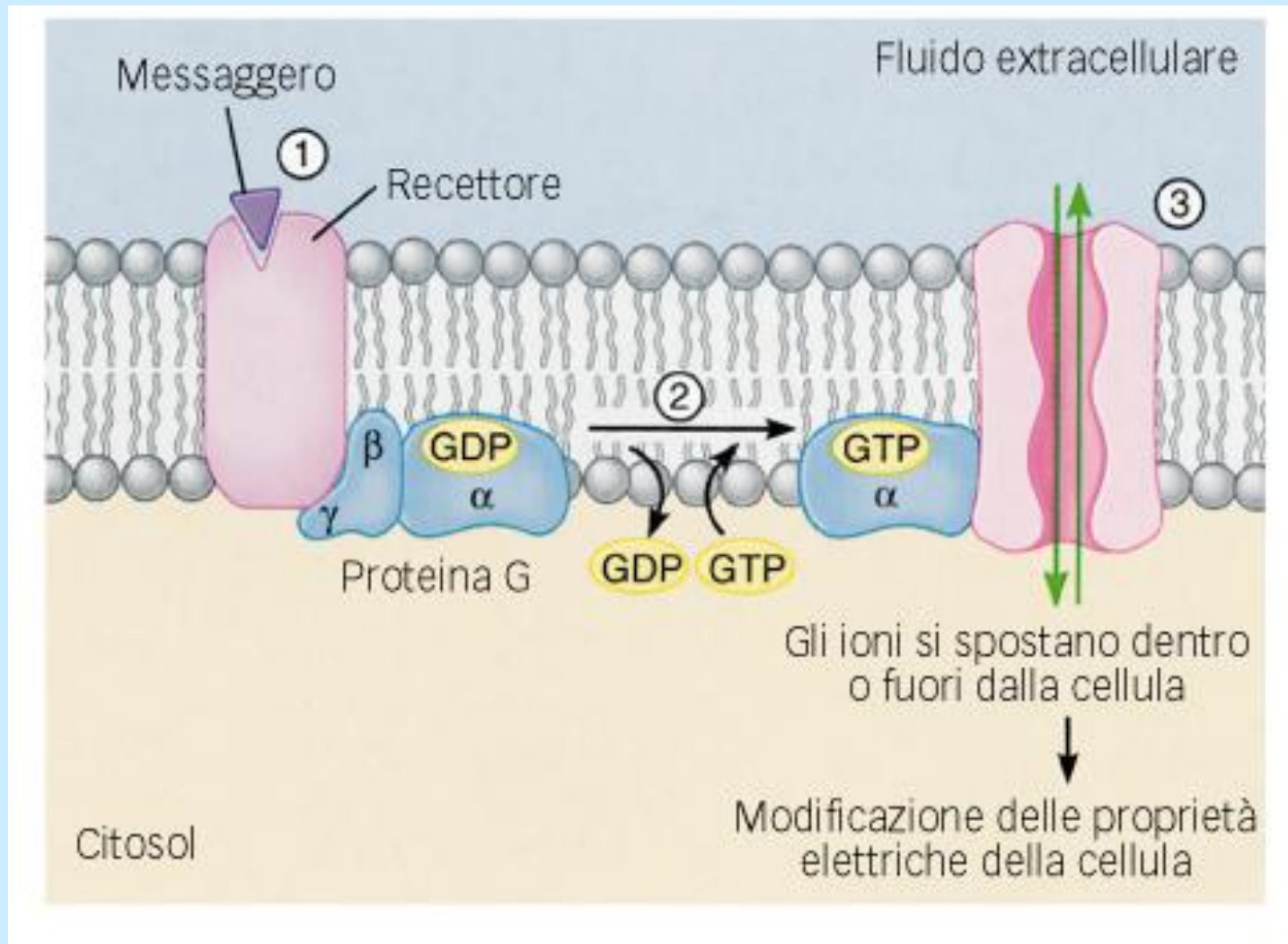


(a) Variazione delle proprietà elettriche di una cellula mediante canali attivati dal ligando

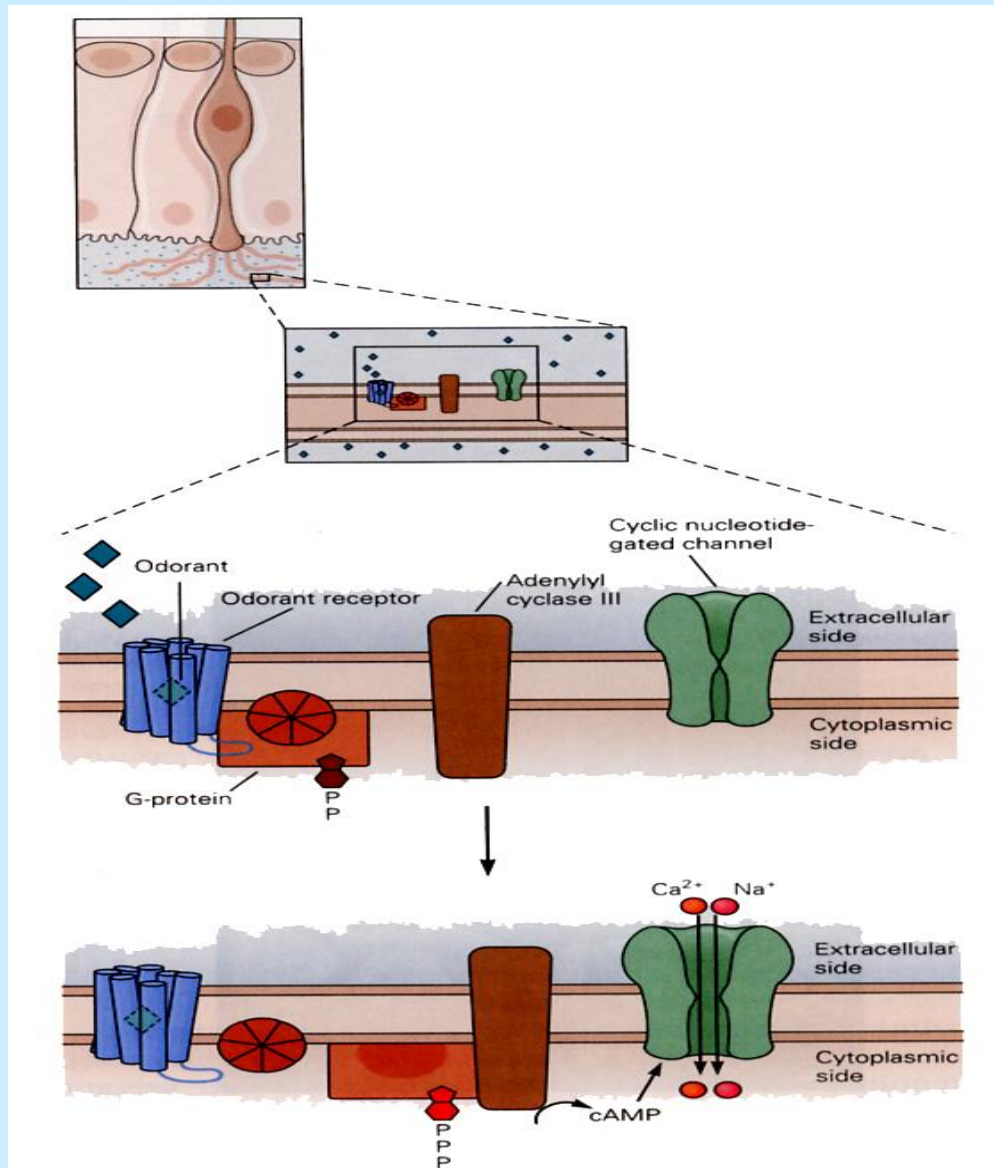
# Recettori-proteine G



# Azione di una proteina G su un canale ionico lento attivato da un ligando

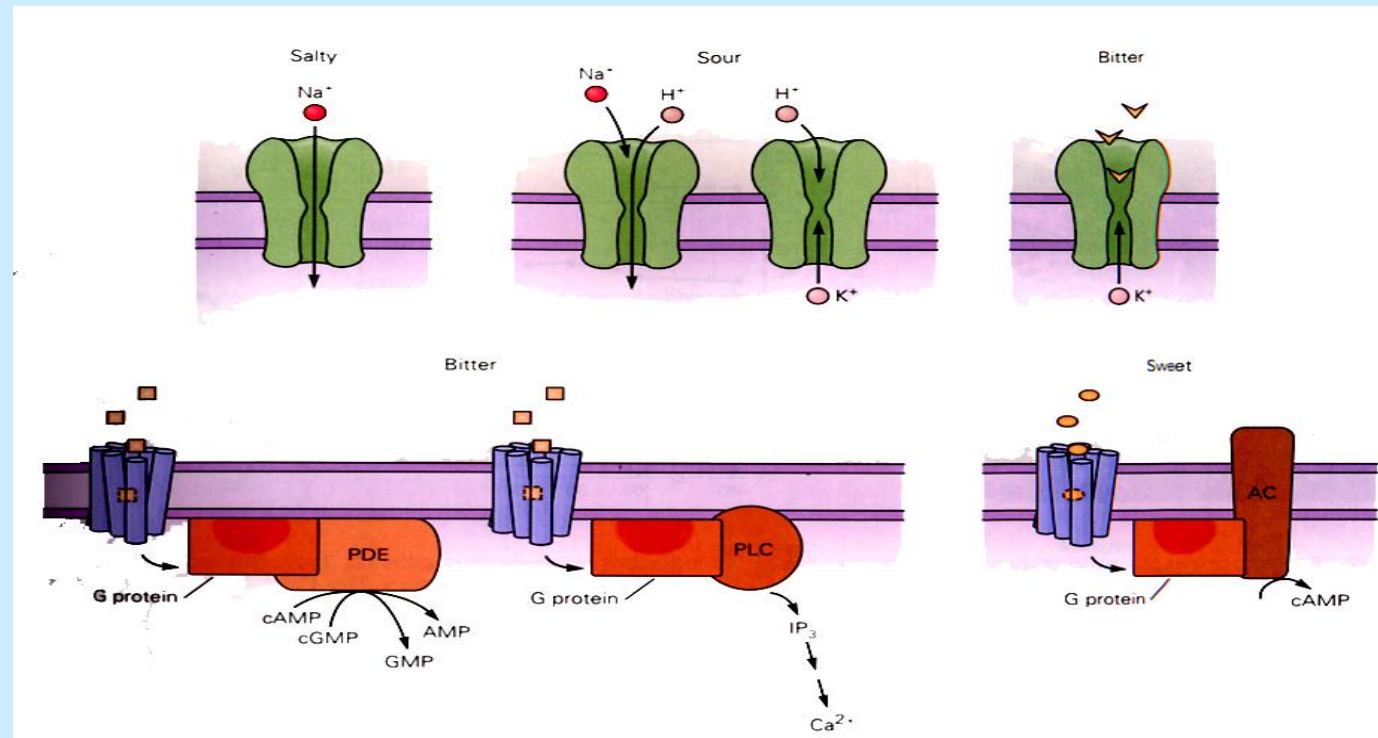


# Ricezione e trasduzione olfattoria



Una molecola volatile si lega al suo recettore specifico, che interagisce con una proteina G la cui subunità alfa legata al GTP stimola l'adenilciclastasi III. Il conseguente aumento di cAMP apre canali cationici dipendenti dai nucleotidi ciclici e determina l'ingresso di cationi e la variazione del potenziale di membrana del cilio.

# Ricezione gustativa



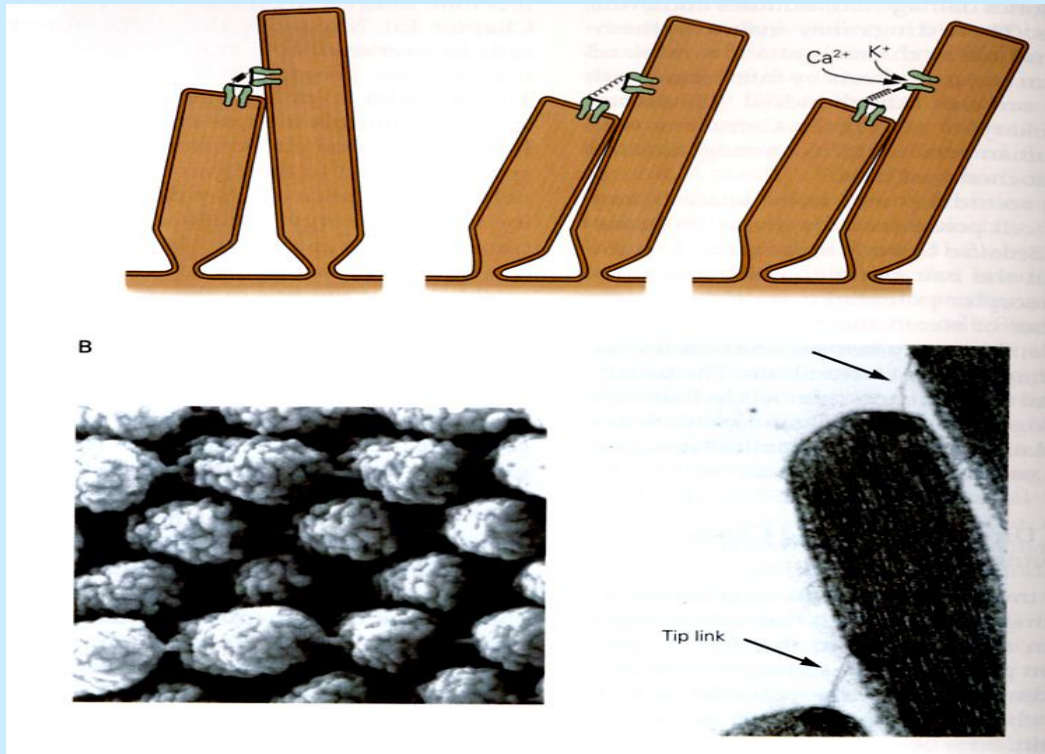
**Salato:**  $\text{Na}^+$  attraverso i canali del  $\text{Na}^+$  sensibili all'amiloride.

**Aspro:** -  $\text{H}^+$  attraverso i canali del  $\text{Na}^+$  sensibili all'amiloride; - blocco di canali apicali del  $\text{K}^+$ .

**Amaro:** - il chinino blocca i canali del  $\text{K}^+$ ; - G proteina stimola la fosfolipasi C determinando  $>$  di  $\text{IP}_3$  che a sua volta determina liberazione di  $\text{Ca}^{2+}$  dai depositi. - Gustoducina attiva una fosfodiesterasi che determina  $<$  cAMP o cGMP.

**Dolce:** - gustoducina; - G proteina che stimola produzione  $\text{IP}_3$ ; - proteina G che interagisce con l'adenilciclastasi, facendo aumentare AMPc che determina fosforilazione di canali K

# Trasduzione meccanoelettrica delle cellule ciliate



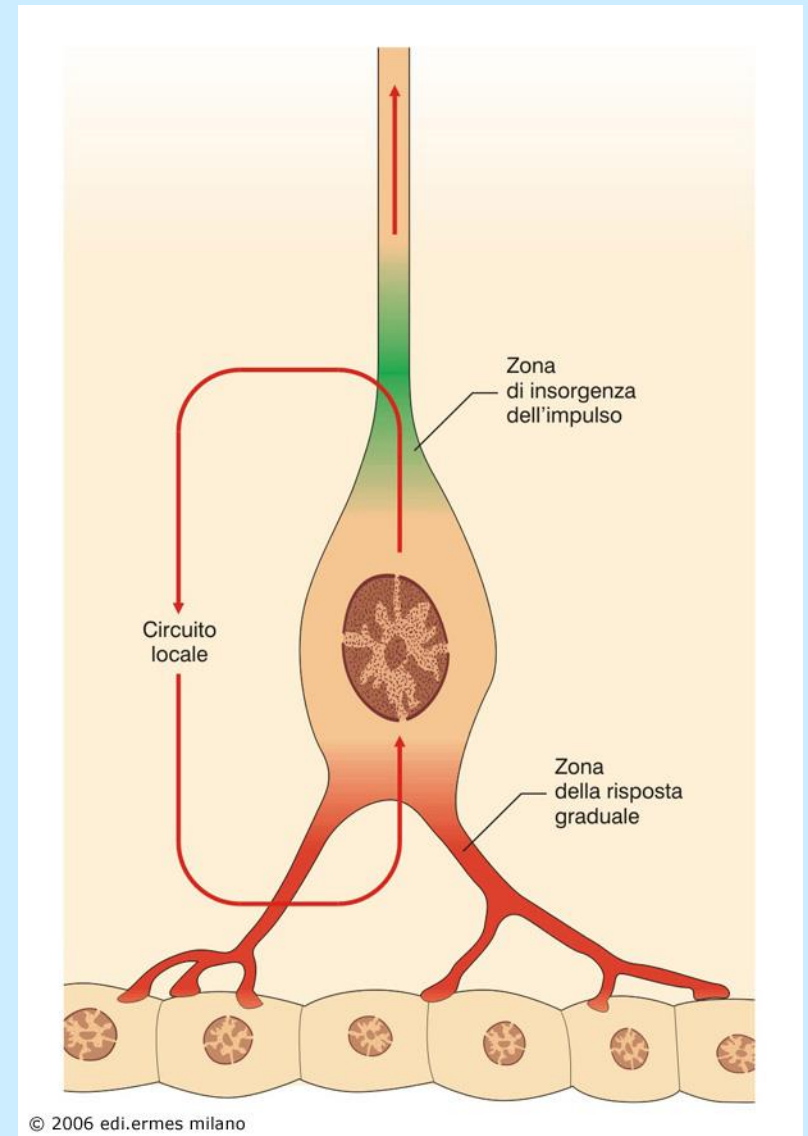
L'accesso ai canali ionici che determinano il processo della traduzione nelle cellule ciliate è regolato da una porta d'accesso molecolare, la cui apertura o chiusura viene controllata dalla tensione di un elemento elastico, o molla d'accesso, sensibile alla deflessione delle cilia.

# Potenziale del recettore

- L'attivazione massimale di un recettore in risposta ad uno stimolo di saturazione determina un valore massimo del potenziale del recettore che risulta circa intermedio tra i potenziali di equilibrio delle specie ioniche interessate quando per l'apertura di tutti i canali, si instaura un equilibrio dinamico tra i flussi delle specie ioniche.
- Il potenziale del recettore è quindi un fenomeno graduato in funzione dell'intensità dello stimolo e che dura per tutta la durata dello stimolo.

# Potenziale del recettore

- Il potenziale del recettore si propaga elettrotonicamente con decremento lungo la membrana e può eventualmente innescare una risposta tutto-o-nulla

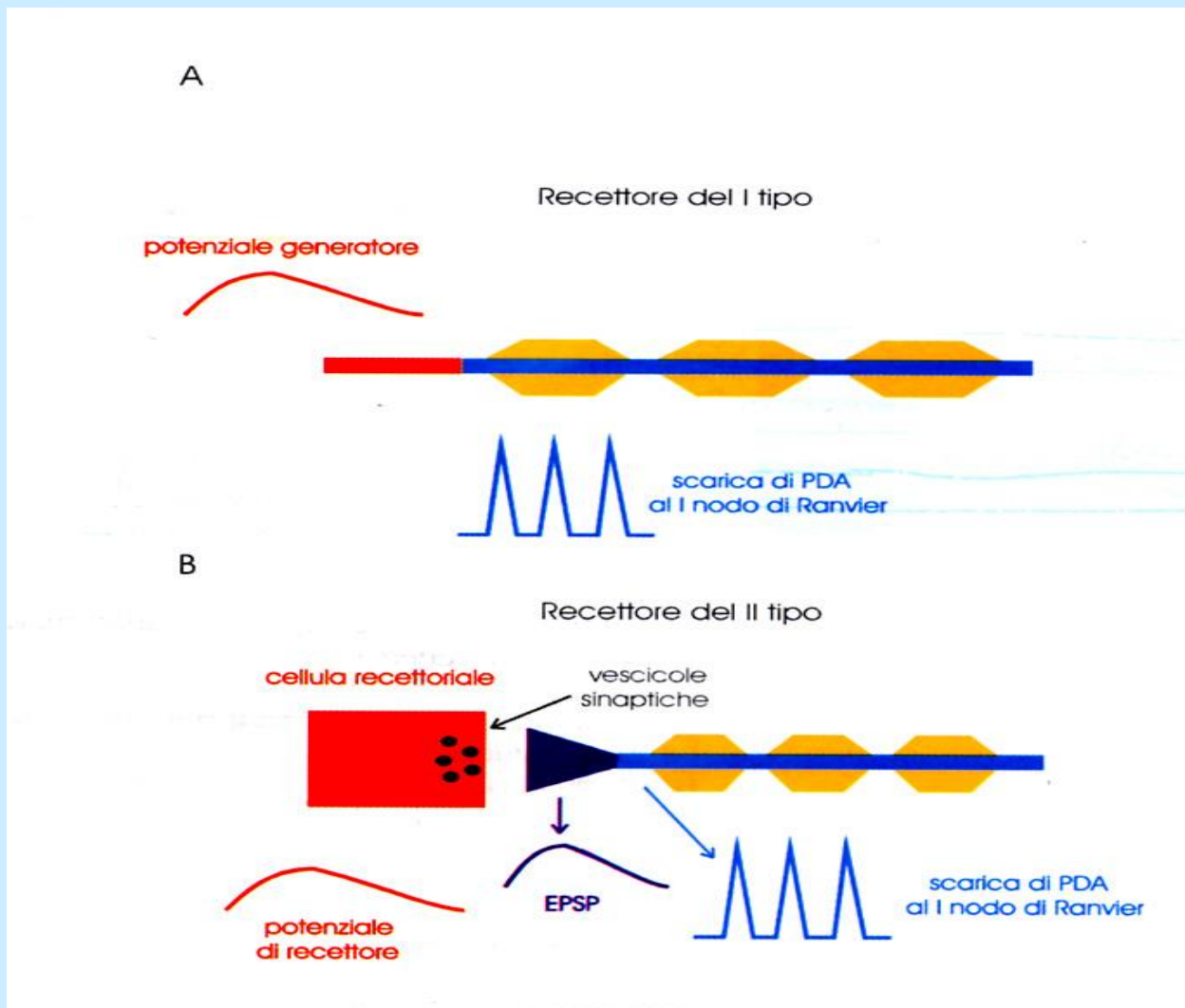


# Codificazione

La corrente del recettore non è rigenerativa, pertanto può diffondere solo elettrotonicamente.

Affinchè, l'informazione sensoriale si possa diffondere su lunghe distanze, il potenziale del recettore deve essere codificato in potenziali d'azione.

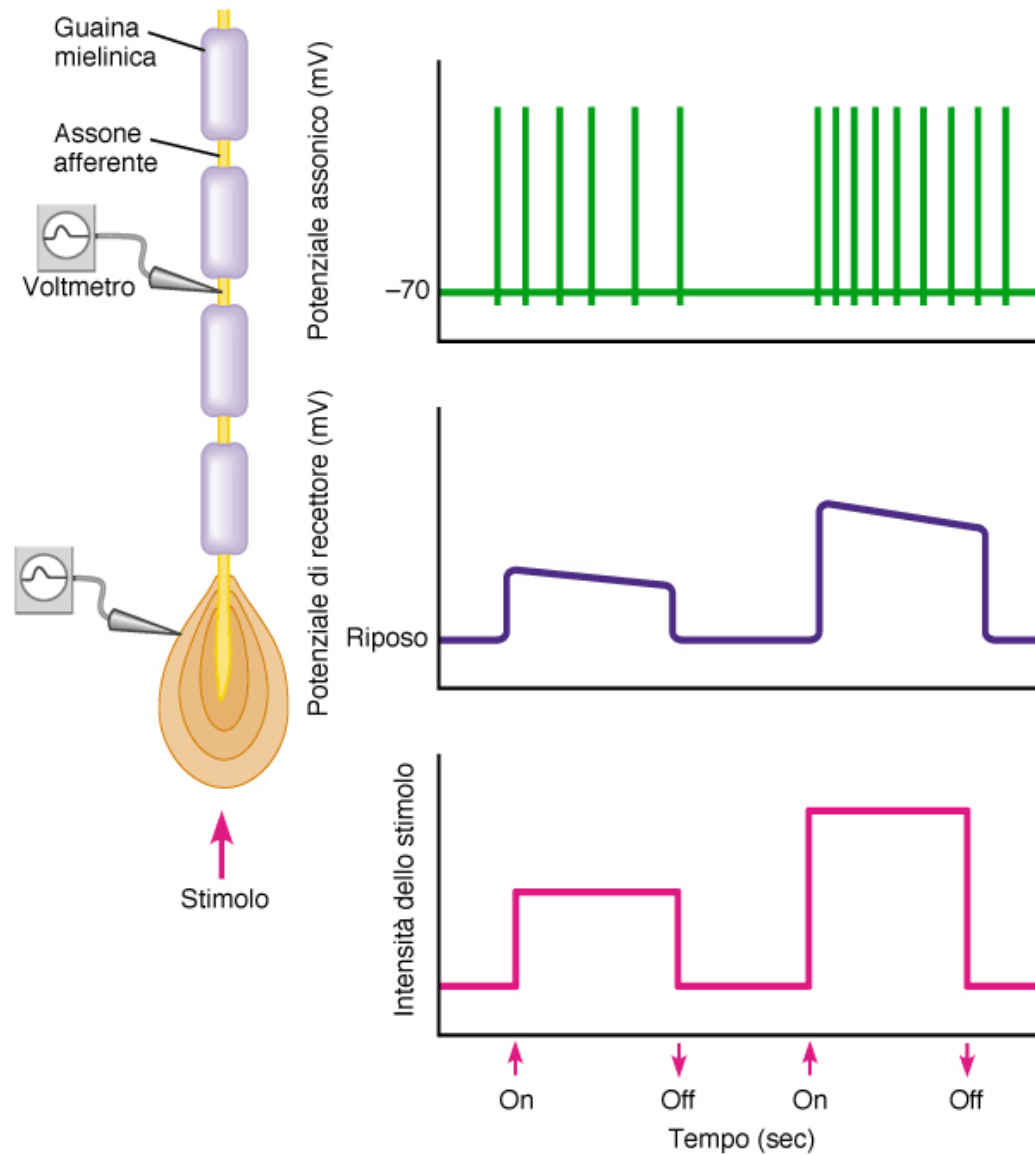
Ciò si realizza in uno dei seguenti modi:



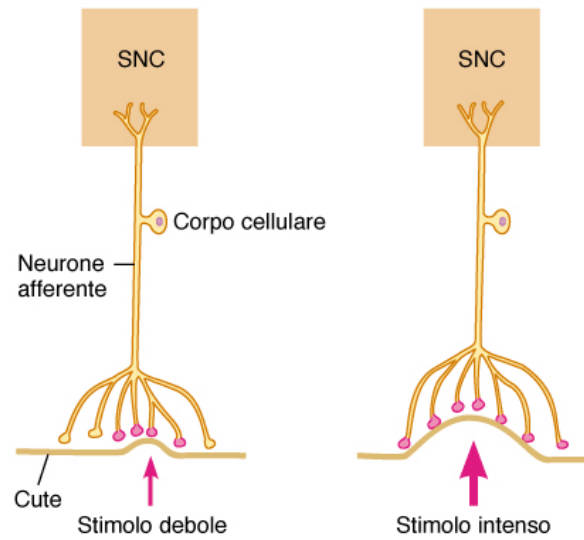
# Codificazione dell'intensità dello stimolo

L'intensità è codificata dalla frequenza e dal numero di recettori attivati.

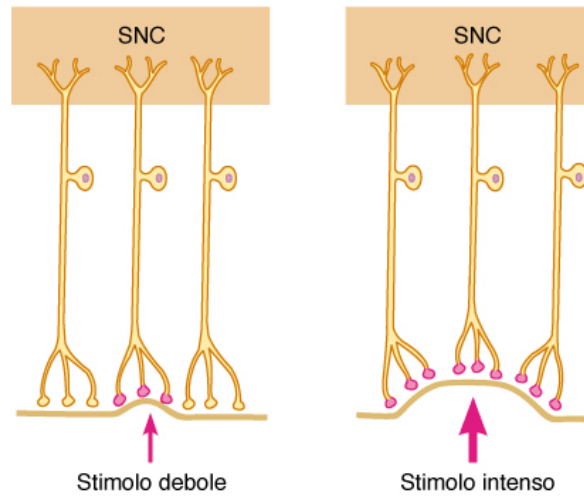
Uno stimolo più intenso da origine a depolarizzazioni più ampie che potranno superare il periodo refrattario relativo di un potenziale d'azione più rapidamente di quanto non farebbe una depolarizzazione più debole



**FIGURA 10.7 Codificazione dell'intensità dello stimolo.** Nella figura sono rappresentate le variazioni del potenziale di membrana lungo l'assone (in alto) e a livello del recettore (al centro) per due stimoli di diversa intensità (in basso). Lo stimolo più intenso rilevato dal recettore induce una scarica a maggior frequenza nell'assone.



(a) Stimolazione di una singola unità sensoriale



(b) Stimolazione di più unità sensoriali

**FIGURA 10.8 Codificazione dell'intensità dello stimolo mediante reclutamento (codice di popolazione).**

(a) Reclutamento di recettori appartenenti a una singola unità sensoriale. (b) Reclutamento di recettori di unità sensoriali aggiuntive.

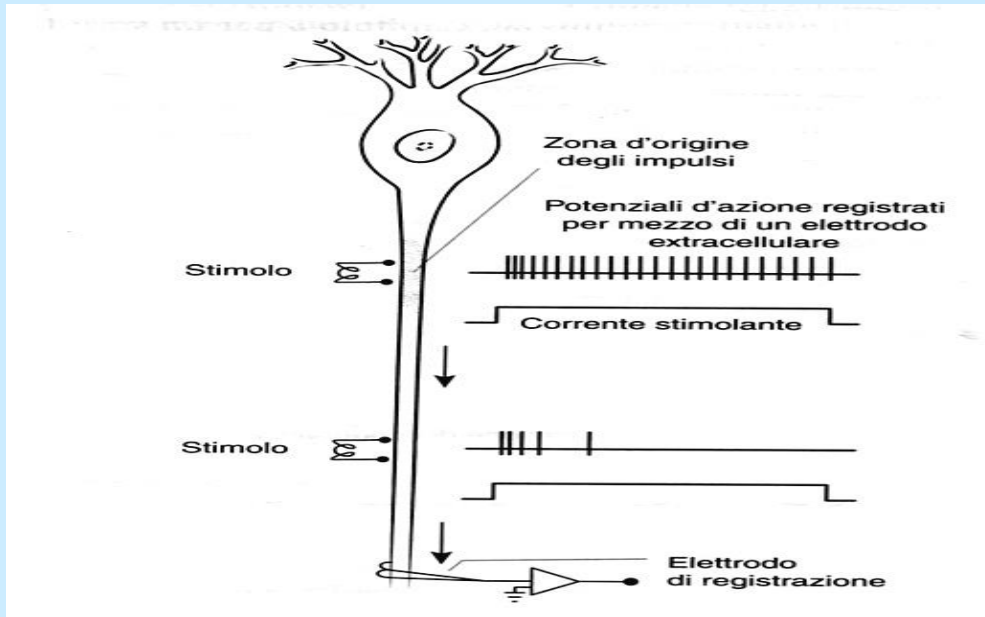
# Codificazione del tipo di stimolo

Il tipo di stimolo è codificato dal recettore e dalla via attivata

Spesso l'encefalo deve integrare le informazioni provenienti da diversi sistemi sensoriali

Es cute bagnata: termocettori e recettori tattili sono propriamente attivati generando la sensazione di umido. Esperimento del guanto

# Ripetitività dell'encoder



L'encoder, che corrisponde generalmente al primo nodo di Ranvier, è la zona d'origine dei potenziali d'azione. Qui la membrana è abbondantemente dotata di canali selettivi per il  $K^+$

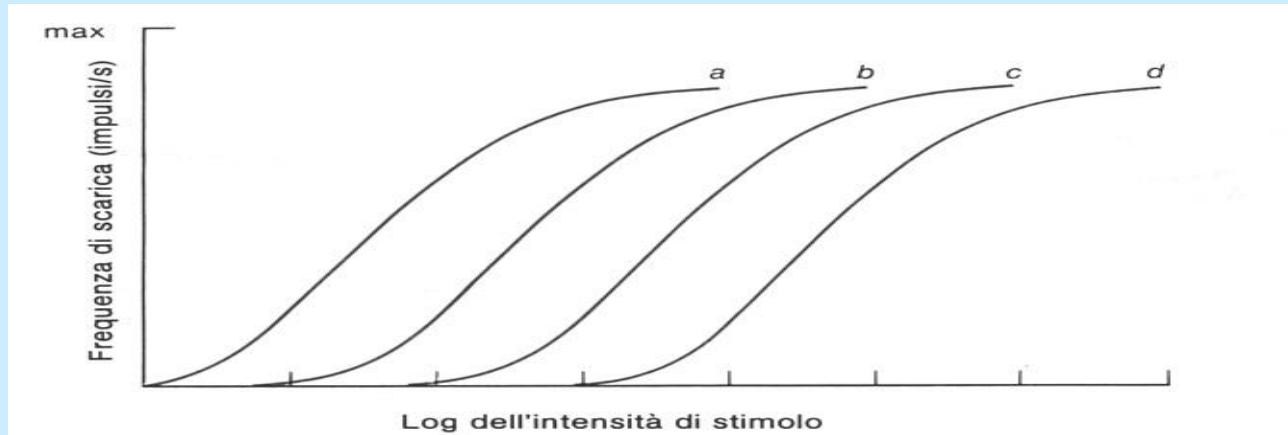
Questi consentono il passaggio di una corrente ( $I_{Kout}$ ) così intensa da rimuovere prontamente l'inattivazione dei canali voltaggio dipendenti al  $Na^+$  in modo da restituire alla membrana la capacità di generare un secondo potenziale d'azione in risposta alle correnti elettrotoniche del potenziale del recettore.

# Relazione stimolo frequenza di impulsi



- L'ampiezza del potenziale del recettore dipende in modo lineare dal log dell'intensità dello stimolo, in un ambito di intensità ampio, ma finito. Essendo il potenziale del recettore limitato dal potenziale di inversione e dalle caratteristiche biofisiche della membrana del recettore.
- Entro un determinato intervallo di valori, la frequenza dei potenziali d'azione è in relazione lineare con l'ampiezza del recettore. Il periodo di refrattarietà limita la frequenza massima.
- Dalle relazioni in A e B risulta che, nella maggior parte dei sistemi sensoriali, la risposta della fibra è proporzionale al logaritmo dell'intensità dello stimolo.

# Frazionamento dell'ambito sensoriale



L'ambito dinamico di un sistema multineuronale è in genere molto più ampio di quello di una singola fibra.

Nell'esempio ogni curva rappresenta la frequenza di scarica di una singola fibra. Ognuna delle 4 fibre presenta un abito dinamico di circa 3-4 unità log di intensità dello stimolo, mentre l'intero ambito dei 4 neuroni copre 7 unità log di intensità

# Adattamento

Normalmente la risposta di un recettore a uno stimolo prolungato è caratterizzata da una durata nettamente inferiore rispetto a quella dello stimolo.

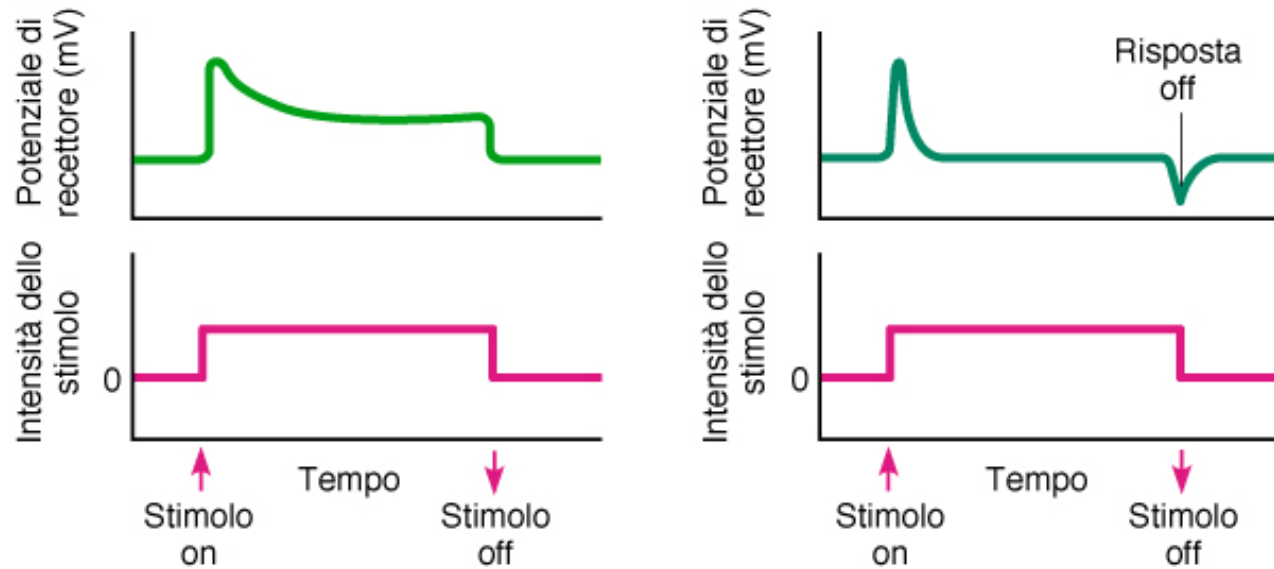
L'adattamento rappresenta il decremento nel tempo dell'ampiezza del potenziale del recettore in presenza di uno stimolo costante

L'adattamento è dovuto o a particolari caratteristiche di strutture accessorie del recettore, oppure ad attivazione diretta di canali per il  $K^+$ , in particolare quelli  $Ca^{++}$  dipendenti, con conseguente ripolarizzazione della membrana.

# Adattamento

## Recettori tonici a lento adattamento

## Recettori fasico a rapido adattamento

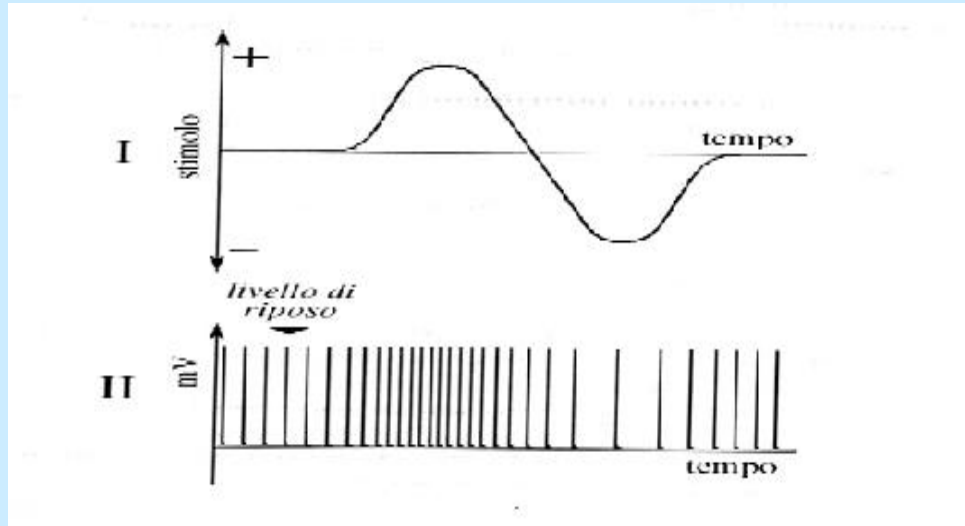


(a) Recettori a lento adattamento

(b) Recettori a rapido adattamento

**FIGURA 10.3 Risposte di recettori a lento e a rapido adattamento.** (a) I recettori a lento adattamento rispondono con un cambiamento del potenziale di recettore che persiste per tutta la durata dello stimolo. (b) I recettori a rapido adattamento rispondono con un cambiamento del potenziale di recettore all'inizio dello stimolo, ma successivamente si adattano. La "risposta off" è una seconda piccola risposta che si verifica nel momento in cui termina la stimolazione.

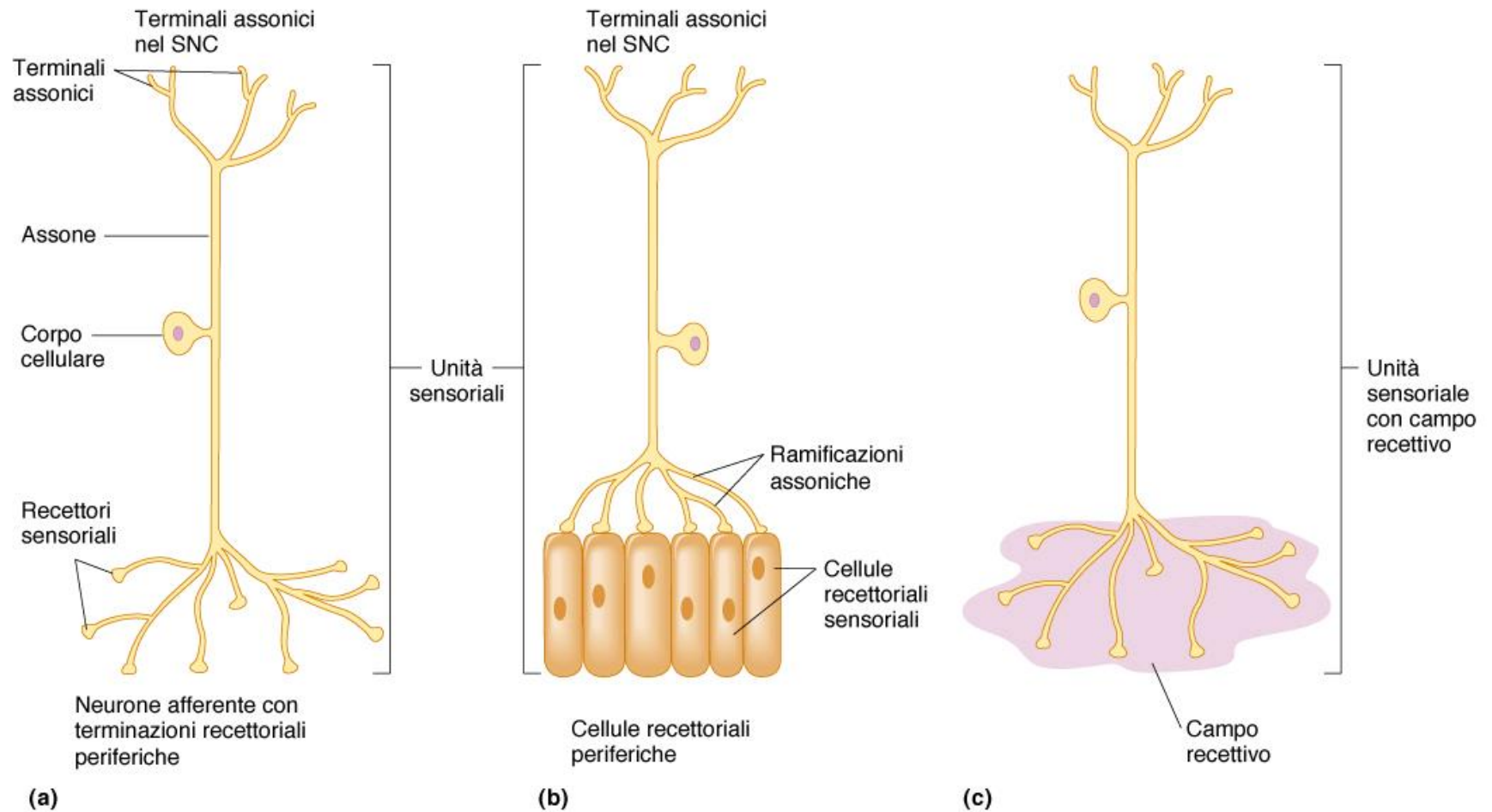
# Attività spontanea



La maggior parte dei neuroni secondari di tutte le vie sensoriali hanno anche a riposo una scarica di potenziali d'azione di base. Ciò determina il vantaggio di poter avere informazioni anche sul segno dello stimolo:

Stimolo positivo = aumento di frequenza

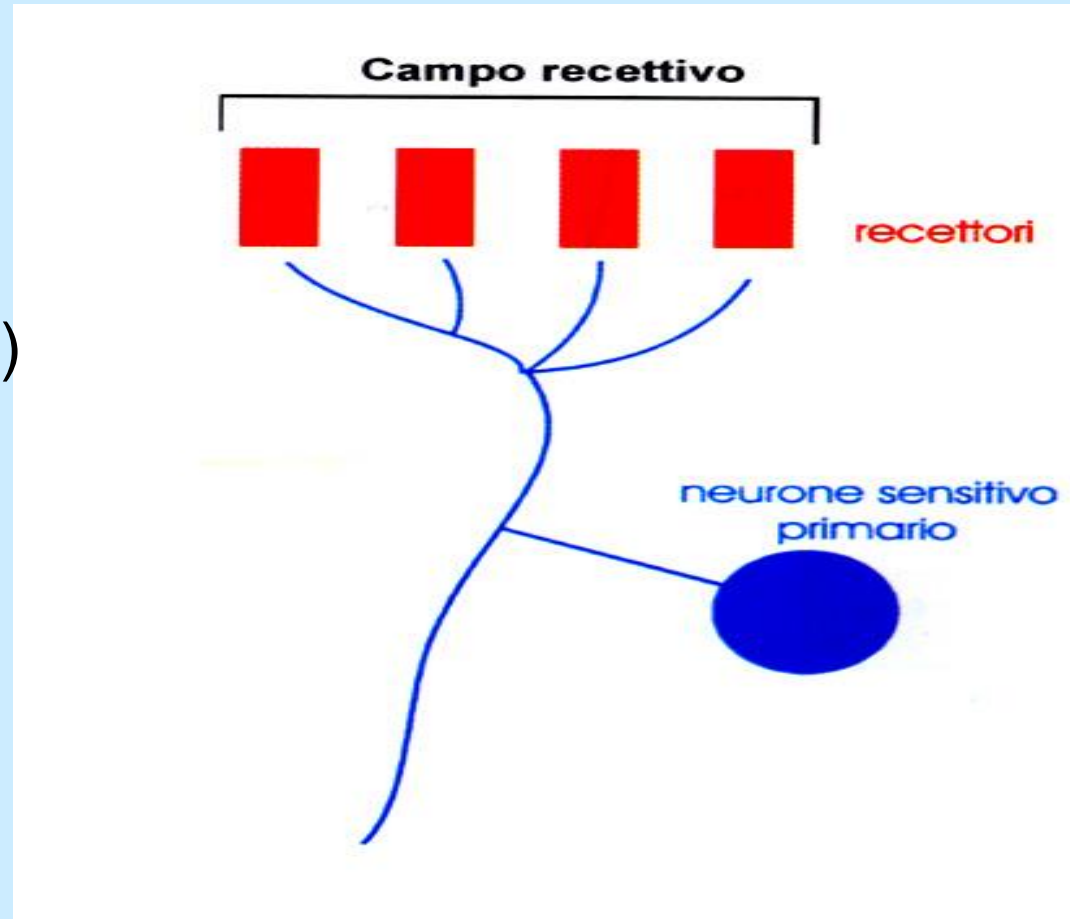
Stimolo negativo = riduzione di frequenza



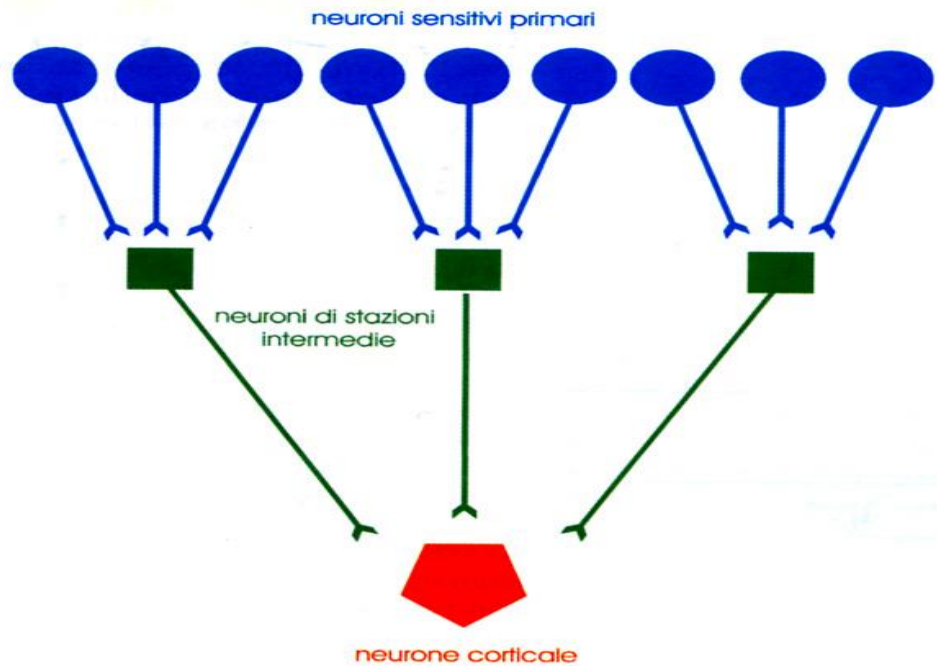
**FIGURA 10.5 Unità sensoriali e campi recettivi.** (a) Un'unità sensoriale nella quale i recettori sono terminazioni specializzate del neurone afferente. (b) Un'unità sensoriale nella quale i recettori sono cellule separate, ognuna delle quali comunica con un unico neurone afferente. (c) Il campo recettivo dell'unità sensoriale rappresentata in (a).

# Campo recettivo

Per campo recettivo di un neurone si intende la porzione di periferia (recettori sensoriali) che quando stimolata da uno stimolo puntiforme porta in attività quel neurone.



Il potere discriminativo spaziale dipende dalla densità dei recettori e da quanto più ristretti sono i loro campi recettivi. D'altro canto è regola generale per tutte le sensibilità che i campi recettivi siano più o meno sovrapposti con la loro parte periferica.

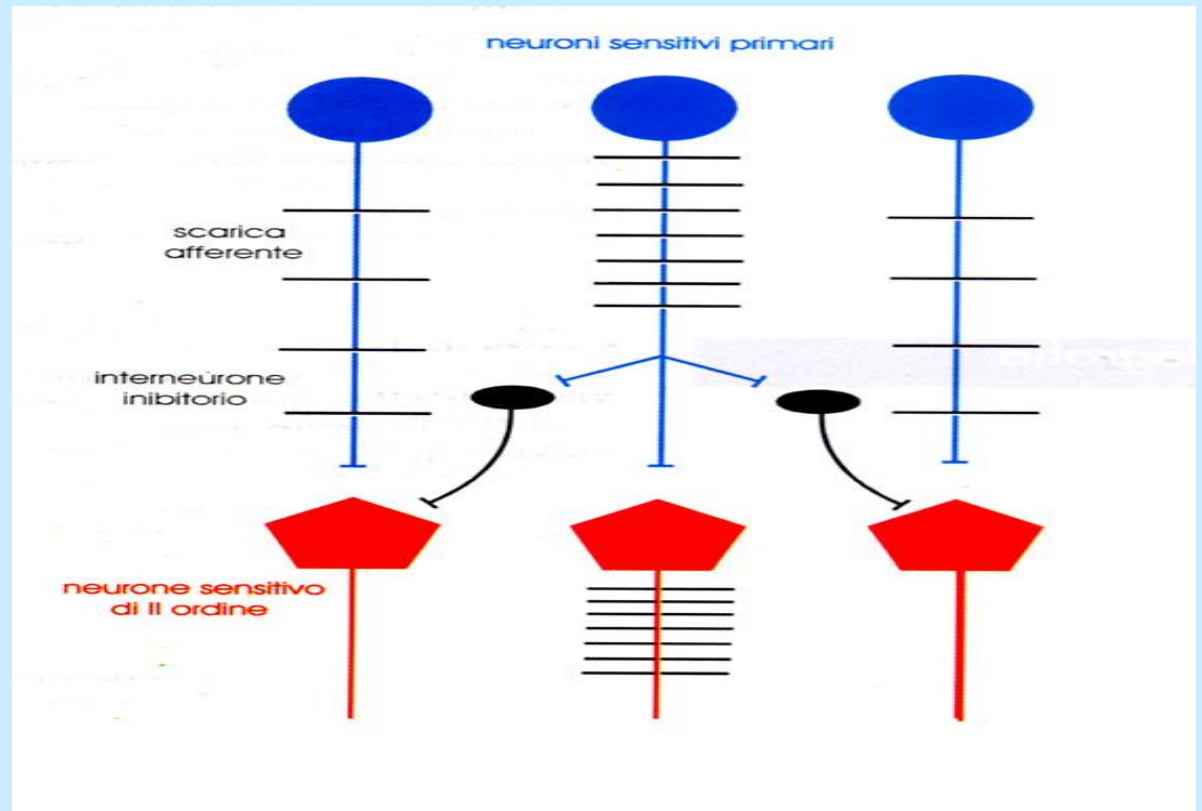


- Il concetto di campo recettivo non riguarda solo i neuroni primari di una via sensitiva, ma riguarda tutte le stazioni nervose cui il messaggio sensitivo è destinato.
- Man mano che si sale nella scala gerarchica delle stazioni intercalate in una via sensitiva, le dimensioni spaziali del campo recettivo aumentano per **il fenomeno della convergenza**.

# Inibizione laterale

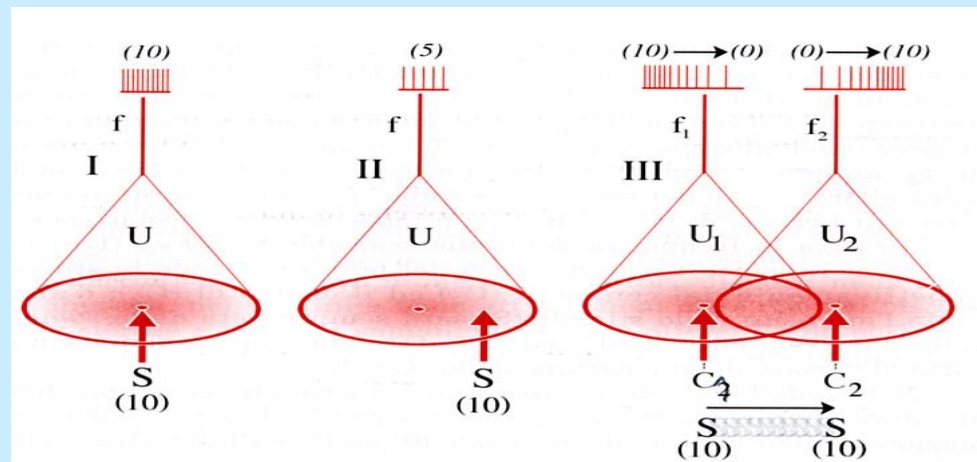
Il neurone di I ordine oltre a prendere rapporto sinaptico con il neurone di II ordine, entra in contatto, attraverso collaterali, con neuroni inibitori che andranno a inibire l'attività di neuroni di II ordine adiacenti. La conseguenza di tale meccanismo sarà quella di evidenziare l'azione del neurone più eccitato.

Tale meccanismo avviene a livello di tutte le stazioni nervose intercalate lungo il percorso dei sistemi sensoriali.

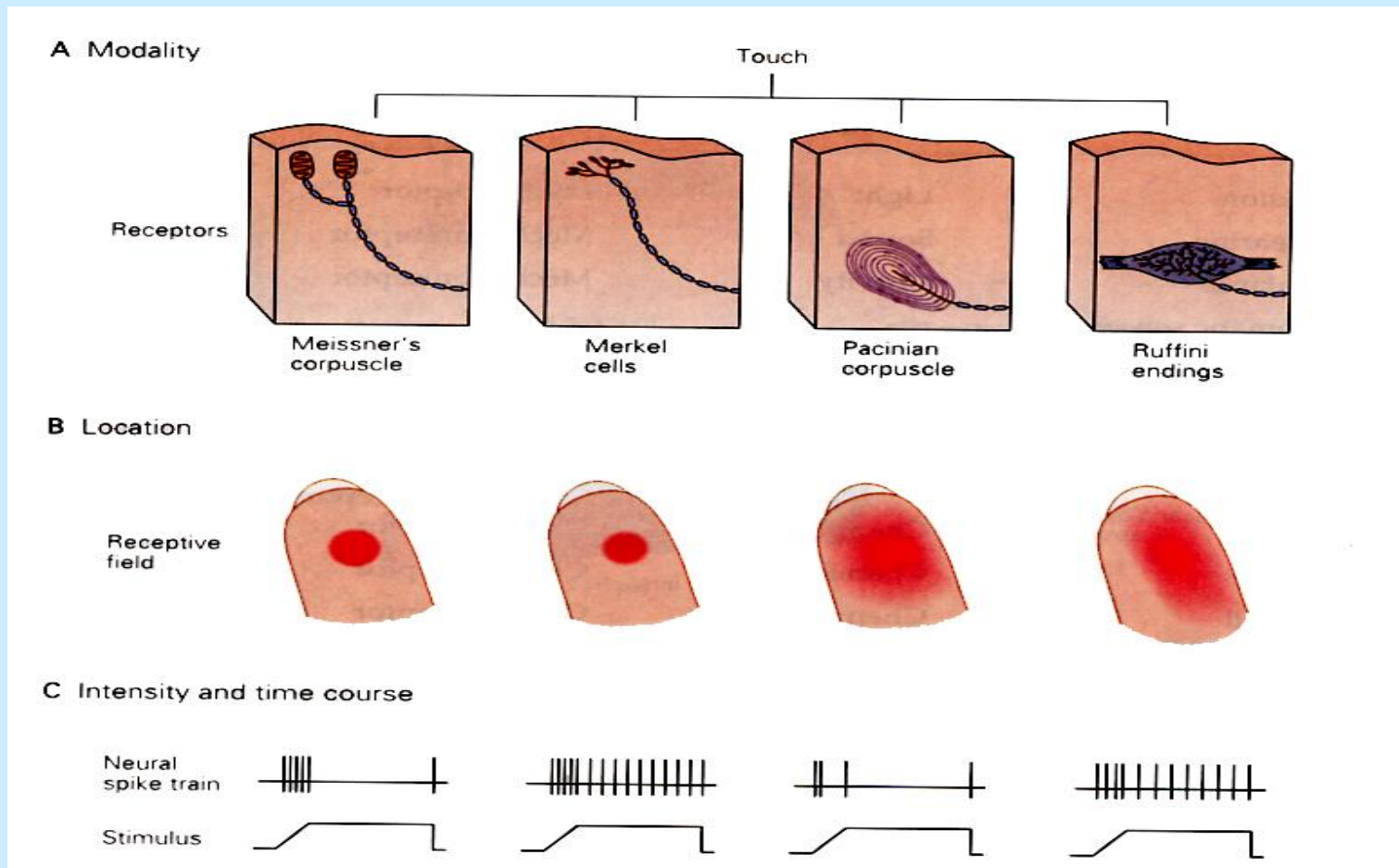


# Trasmissione condivisa delle informazioni sensoriali

La natura ha risolto abilmente il problema di raccogliere e trasmettere ai centri il massimo numero possibile di informazioni sensoriali utilizzando il numero minimo possibile di “canali di trasmissione” costituiti da fibre nervose di senso che altro non portano che scariche di impulsi.



I sistemi sensoriali codificano 4 caratteristiche elementari dello stimolo: **modalità, sede, intensità e decorso temporale.**



## Ricapitolando:

**Variazioni del potenziale di membrana che si verificano nelle cellule eccitabili**

**-POTENZIALI PROPAGATI: potenziale d'azione**

**sono generati in membrane dotate di canali voltaggio-dipendenti**

**-POTENZIALI LOCALI: potenziali del recettore e potenziali post -sinaptici**

**sono generati da membrane sprovviste di canali voltaggio dipendenti per il Na<sup>+</sup> ma provviste di canali attivabili dallo stimolo**

## Caratteristiche dei potenziali d'azione:

- Si propagano: velocità elevata, effetto miccia
- Ampiezza sempre uguale: non dipende dall'intensità dello stimolo (purchè sopra soglia). Seguono la legge del tutto o nulla.
- Sono transitori
- Non sono sommabili
- Presentano refrattarietà: mentre sta generando un potenziale d'azione la membrana transitoriamente è ineccitabile
- L'intensità dello stimolo è codificata in frequenza di impulsi

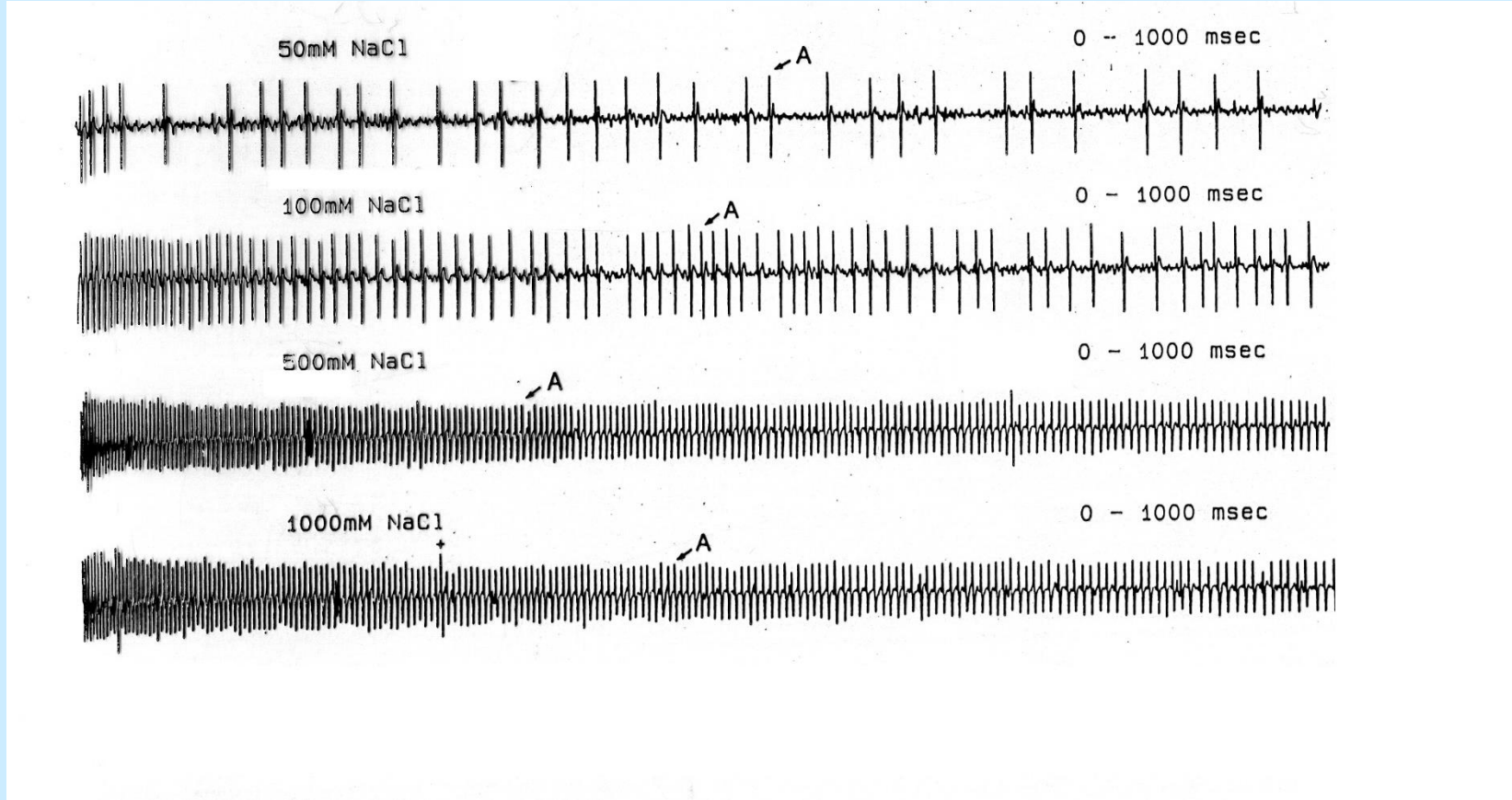
**Vantaggi: rapida comunicazione su grandi distanze**

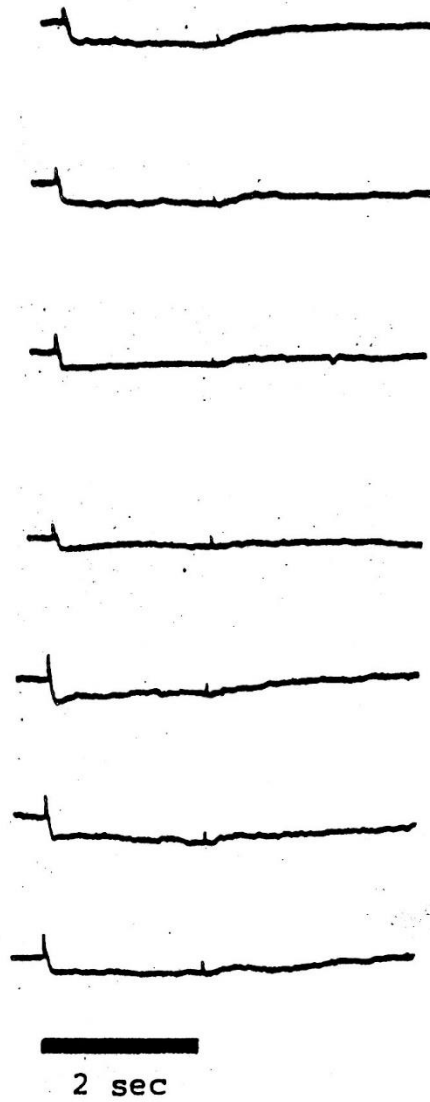
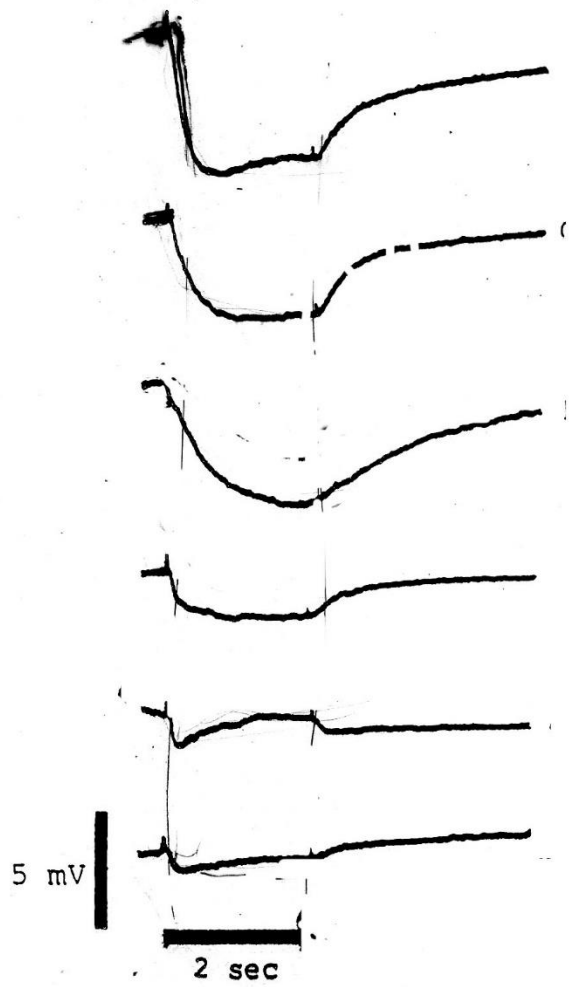
## CARATTERISTICHE dei potenziali locali

- Pur influenzando per via elettrotonica le regioni vicine a quella ove si generano, si trasmettono con decadimento solo a breve distanza
- Sono graduali
- Durata simile a quella dello stimolo
- Sono sommabili temporalmente e spazialmente
- Non presentano refrattarietà

**LIMITE:** breve distanza

**VANTAGGIO:** comunicano in modo diretto informazioni sulla durata e sull'intensità. Comunicano informazioni sul segno dello stimolo





**Di seguito titolo, autore e editore delle fonti da cui sono state prese le immagini e i video mostrati durante le lezioni di fisiologia come supporto didattico :**

Fisiologia, Stanfield - German, Edises

Fisiologia, Silverthorn, Ambrosiana

Fisiologia, Berne – Levy, Ambrosiana

Fisiologia generale e umana, Rhoades- Pflanzner, Piccin

Physiology Animations, versione 2.2.07 Argosy  
Publishing, Inc., 2007-20017