

# Corso di Robotica (ROB)

## Modulo di Robotica Bioispirata

### Percezione vestibolare

Cecilia Laschi

Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna

[cecilia.laschi@sssup.it](mailto:cecilia.laschi@sssup.it)

050-883486



# Sommario della lezione

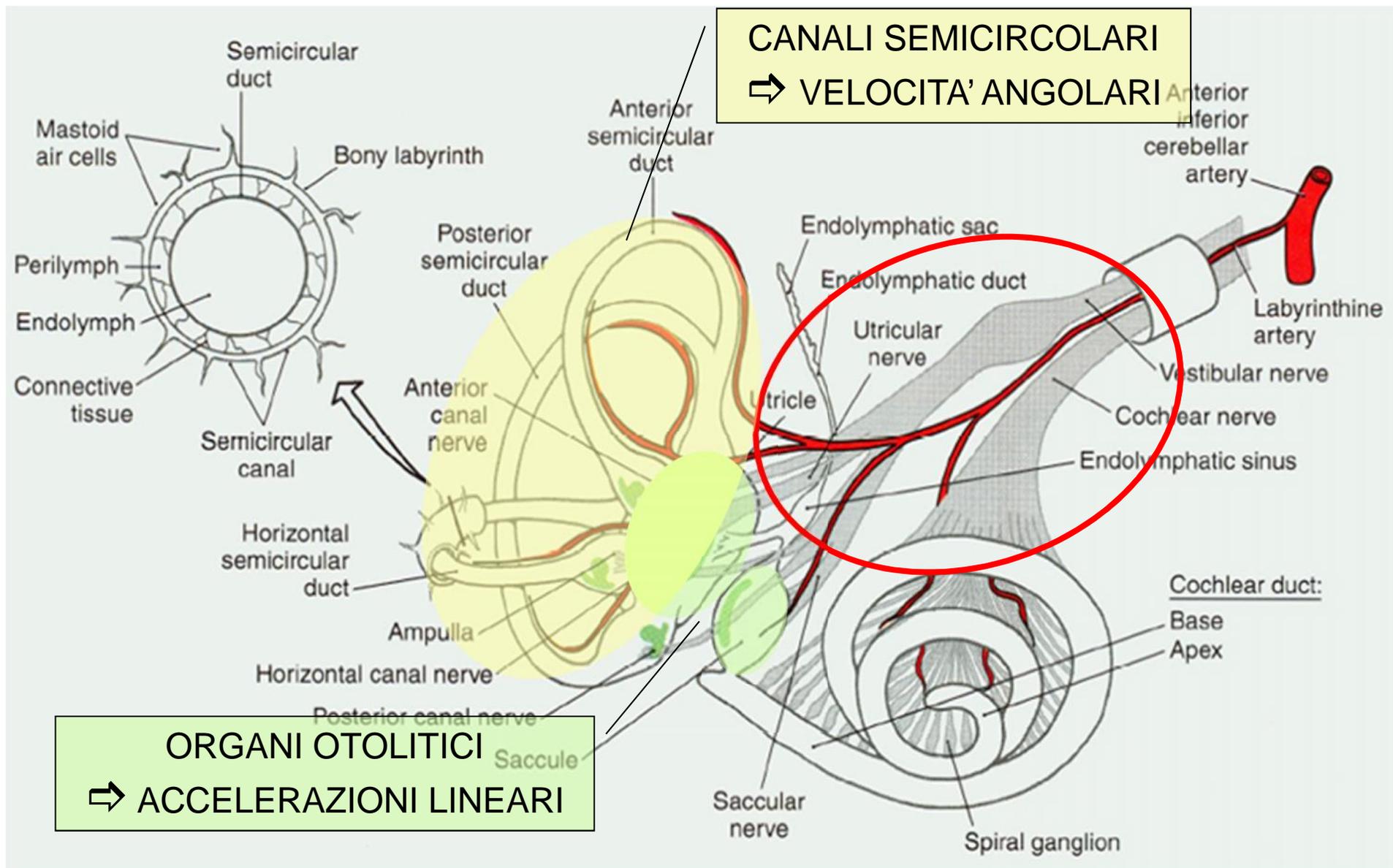
- Il sistema vestibolare nell'Uomo:
  - Funzioni e ruolo del sistema vestibolare nell'Uomo
  - Anatomia e neurofisiologia del sistema vestibolare
- Sistemi vestibolari artificiali
  - Dispositivi sensoriali funzionalmente analoghi:
    - accelerometri
    - giroscopi



# Sistema vestibolare

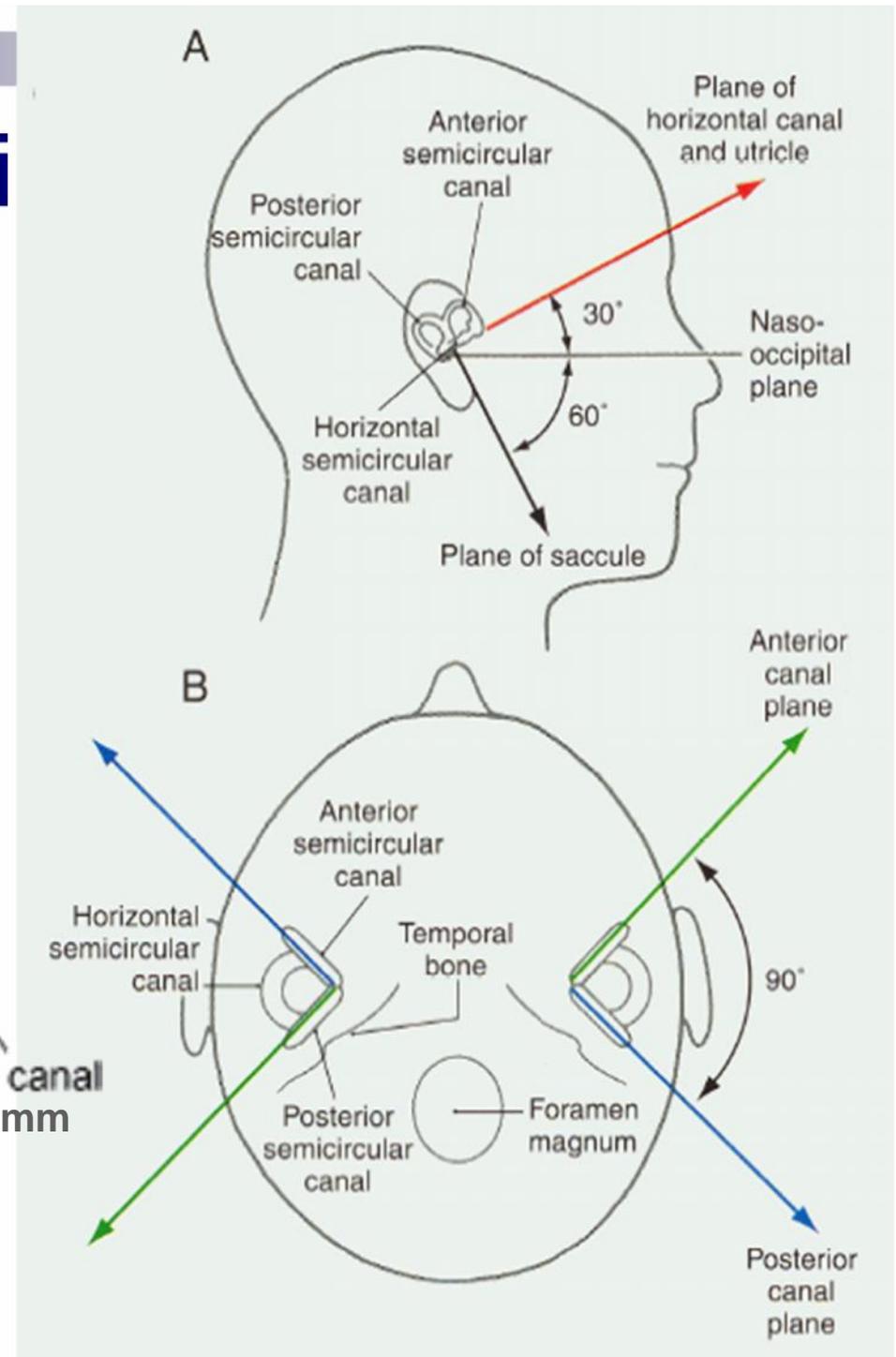
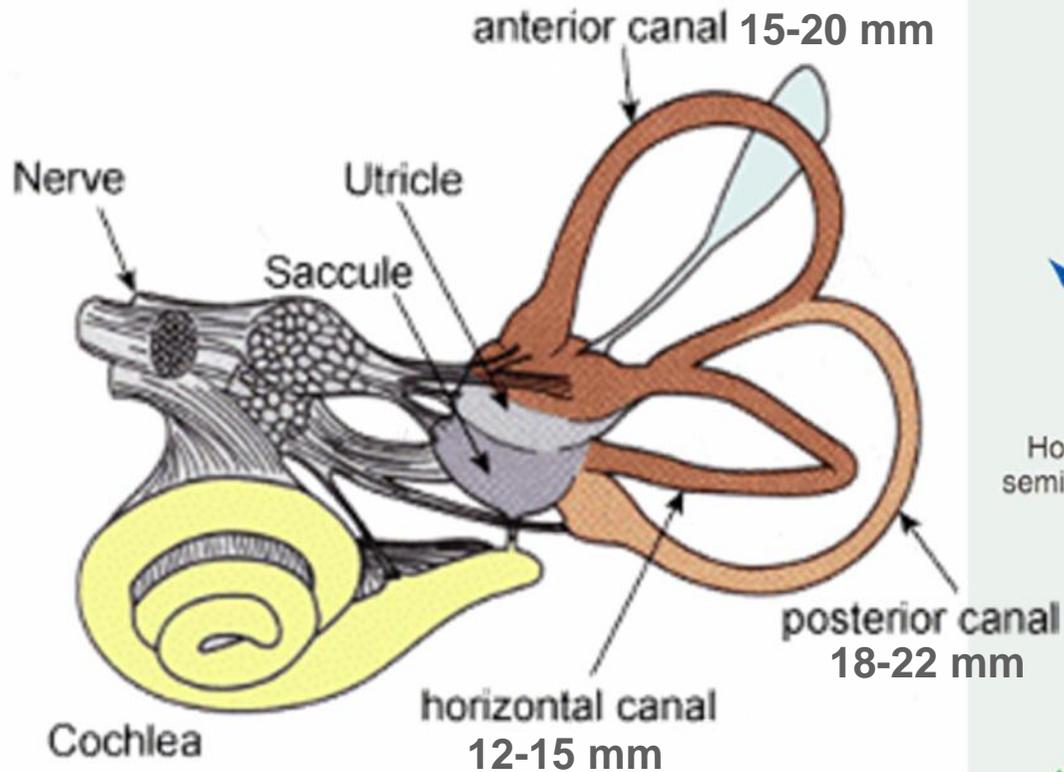
- “Organo dell’equilibrio”
- Sensibile a:
  - movimenti della testa
  - posizione della testa nello spazio
- Misura:
  - velocità angolari
  - accelerazioni lineari
- Ruolo fondamentale, a livello inconscio, in varie funzioni motorie:
  - controllo della postura
  - coordinazione dei movimenti
  - controllo dei movimenti oculari

# Il sistema vestibolare umano

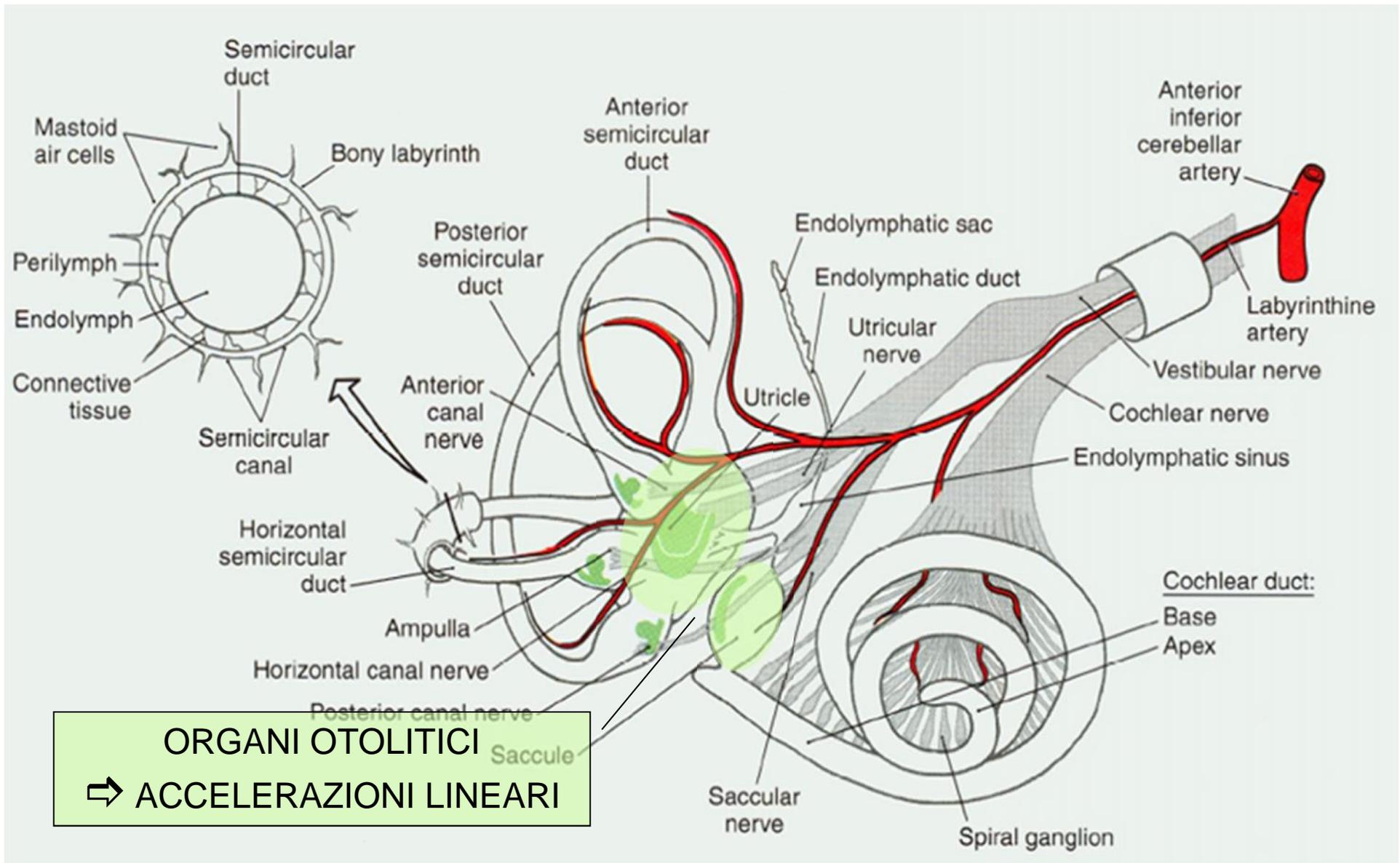


# I canali semicircolari

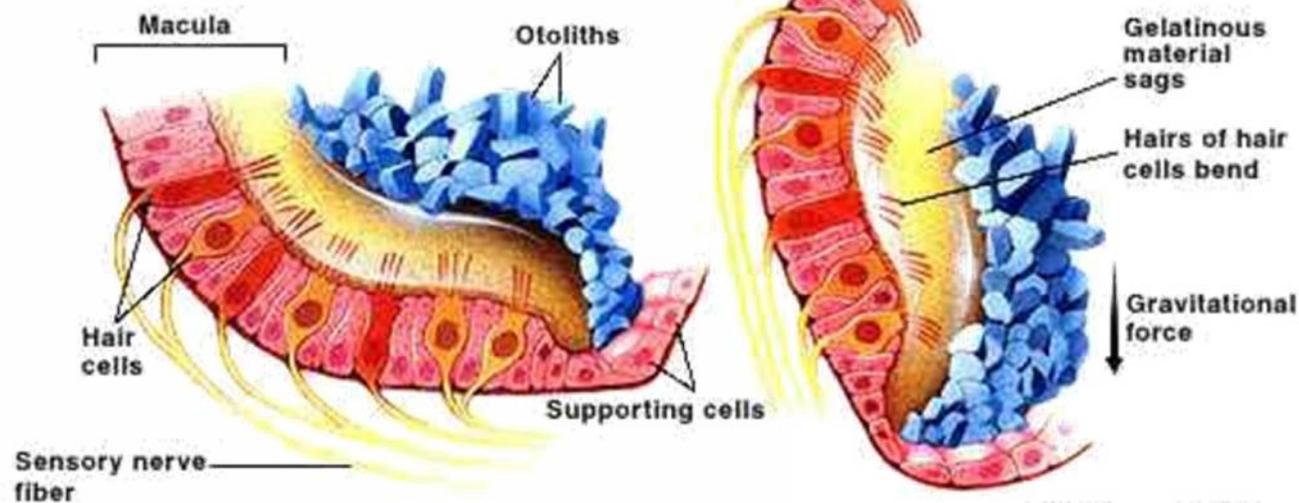
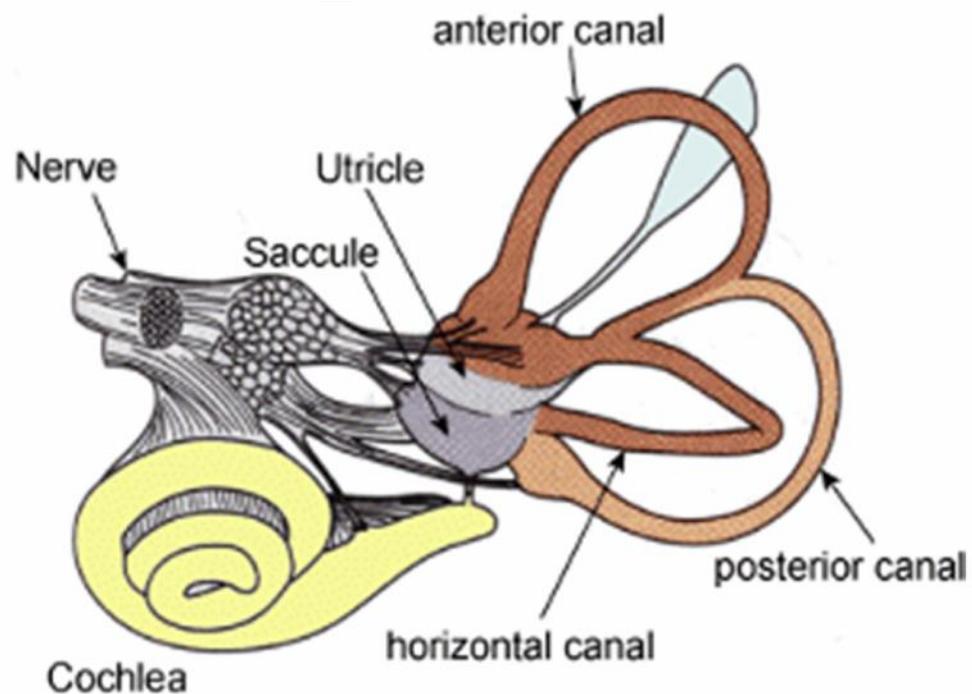
2/3 di circonferenza di diametro 6,5 mm  
diametro interno: 0,4 mm



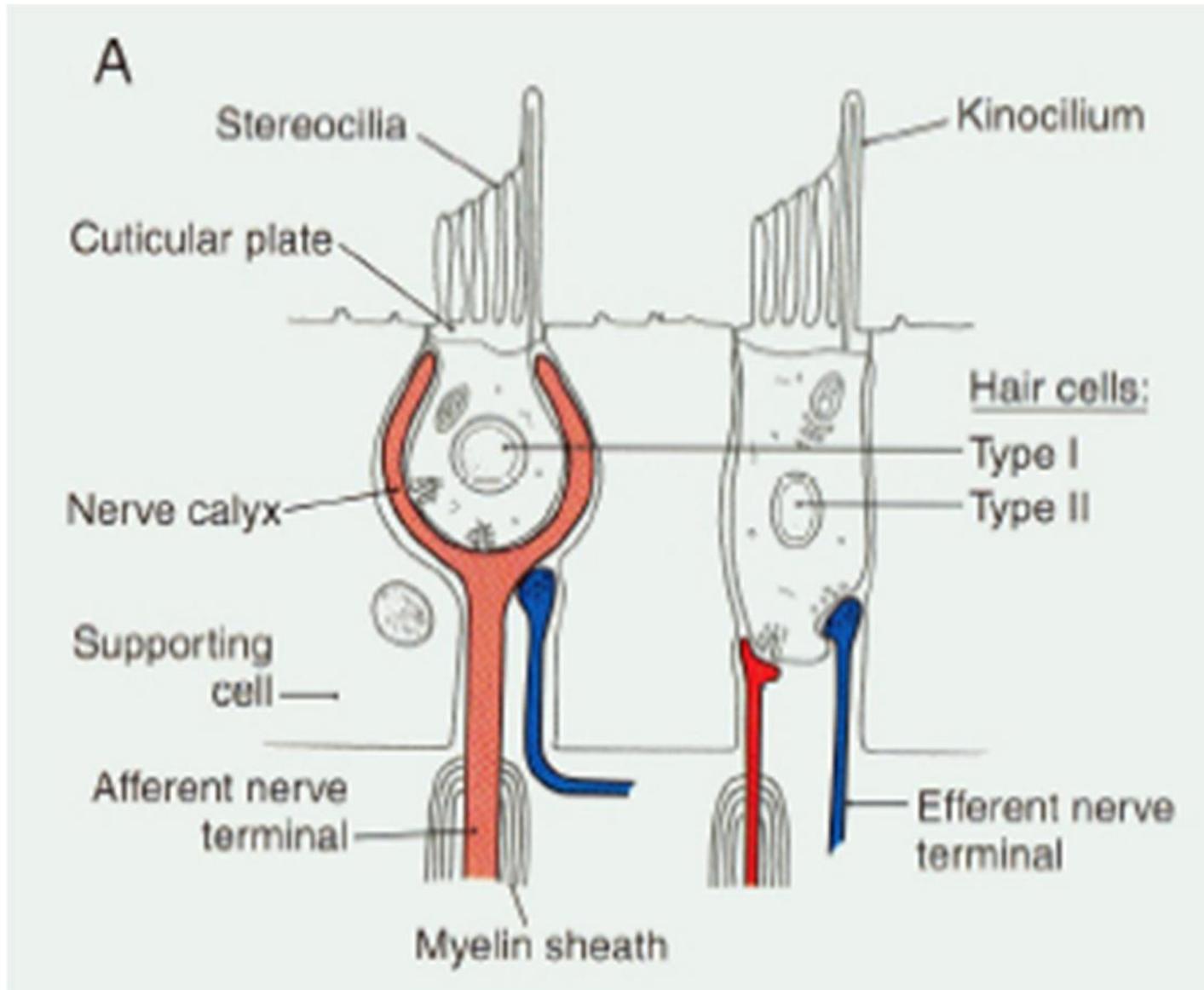
# Gli organi otolitici



# Gli organi otolitici



# I recettori vestibolari



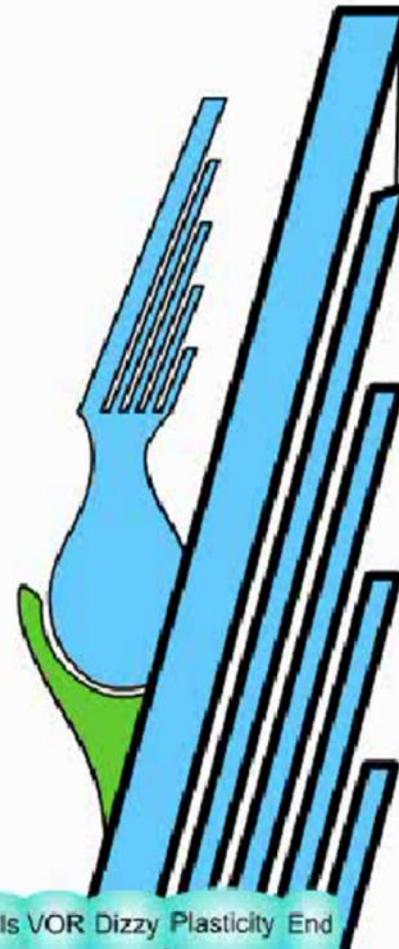
# I recettori vestibolari



## How is motion transduced into neural firing?

The steps are.

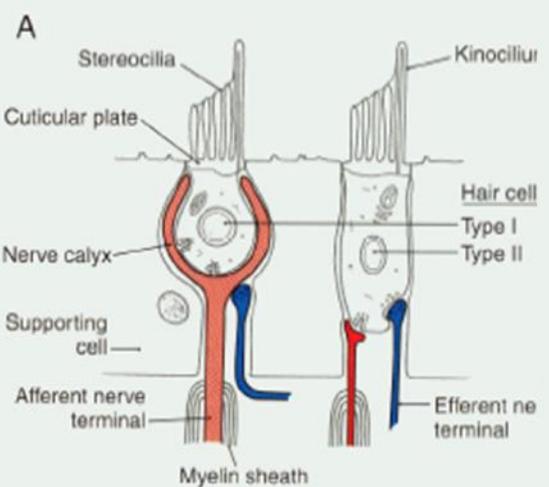
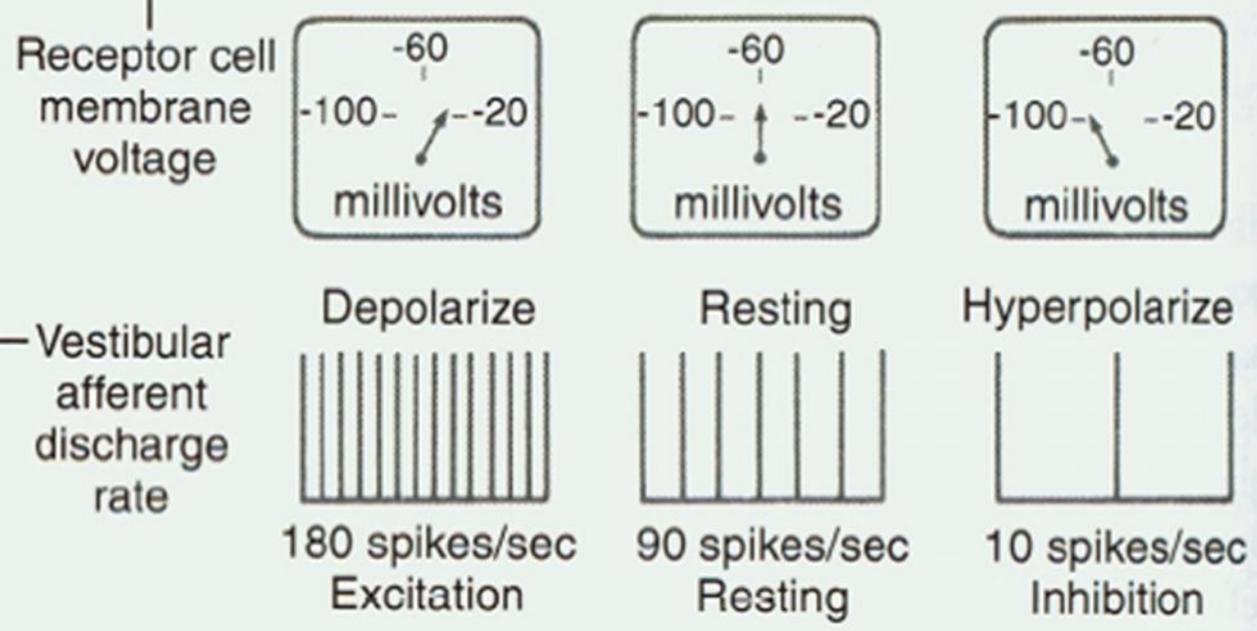
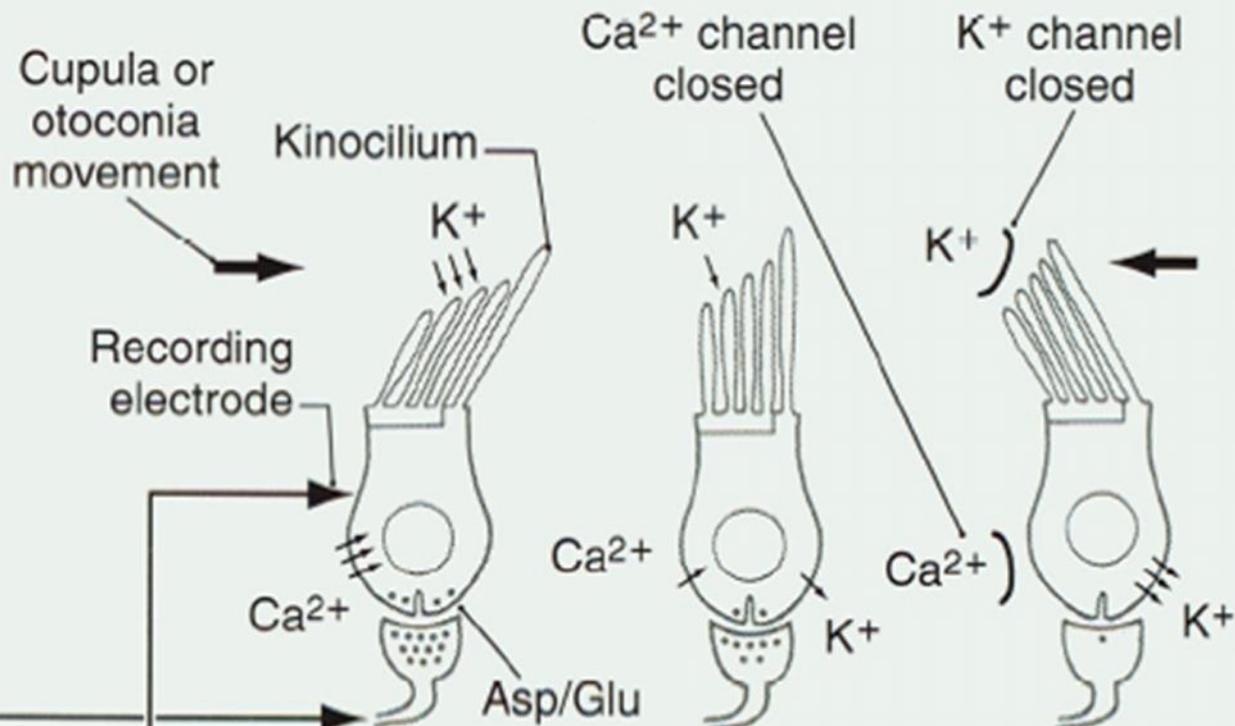
- 1) As in auditory hair cells, motion bends the hairs.
- 2) The filament between adjacent hairs opens ion channels allowing  $K^+$  to enter the hair cell.
- 3) The hair cell depolarizes, releasing neurotransmitter.
- 4) There is an increase in the frequency of AP's in the bipolar 8th nerve afferent.



Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End



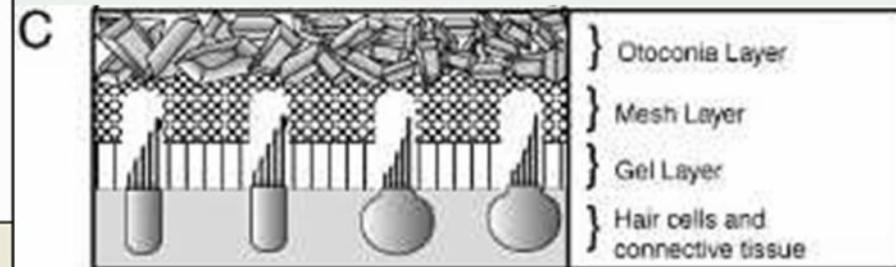
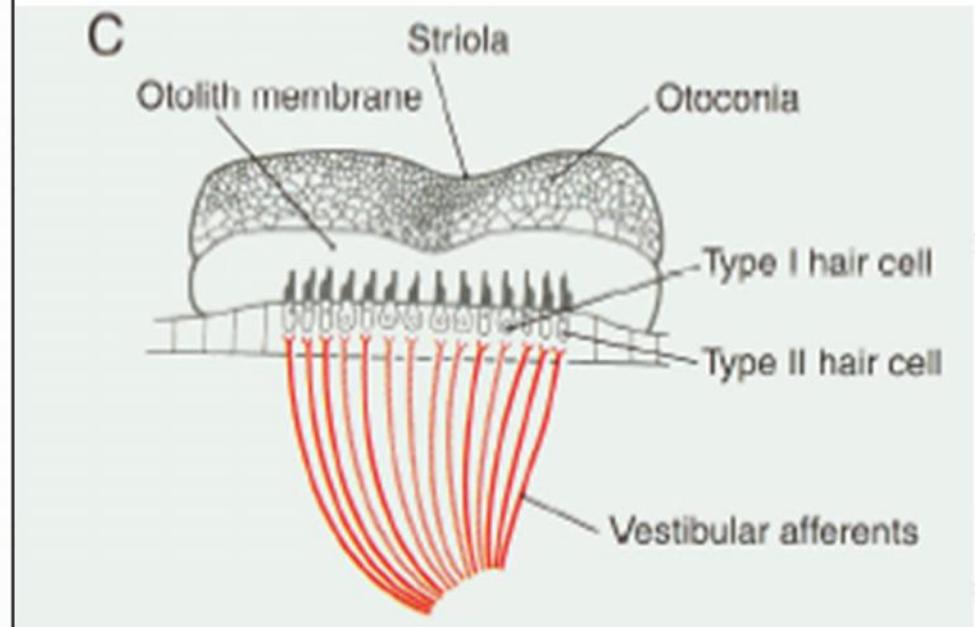
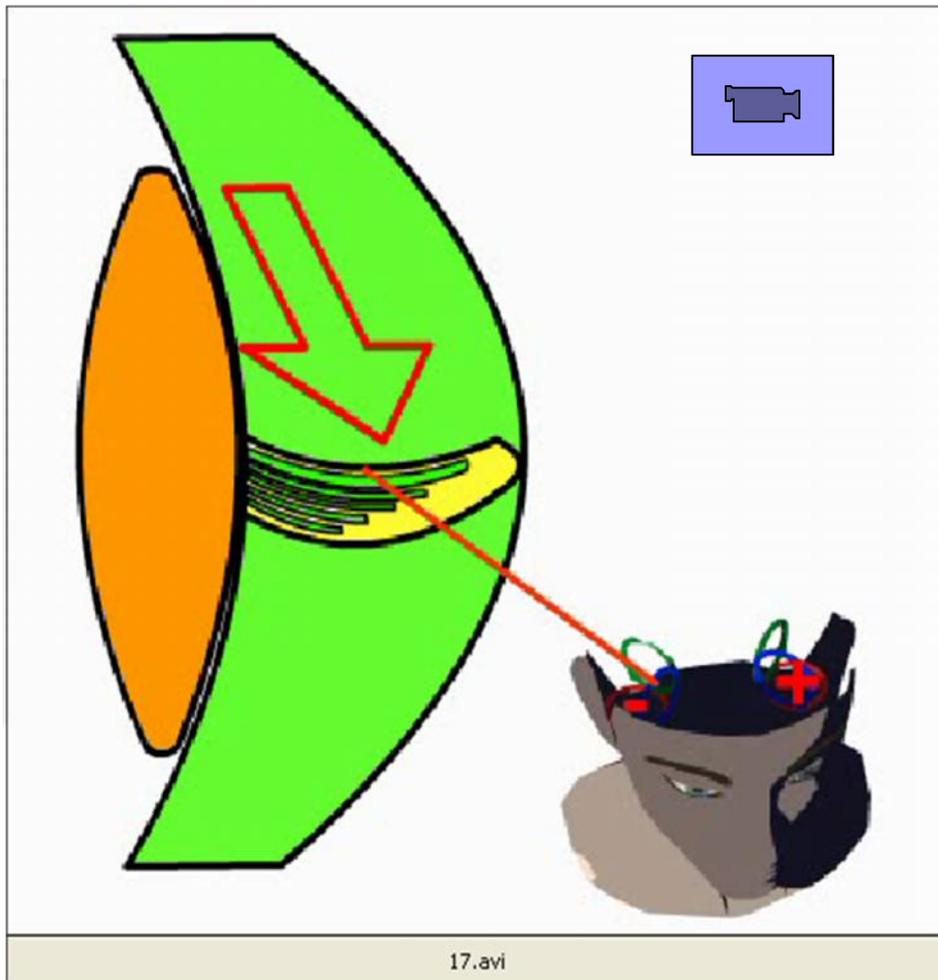
# I recettori vestibolari



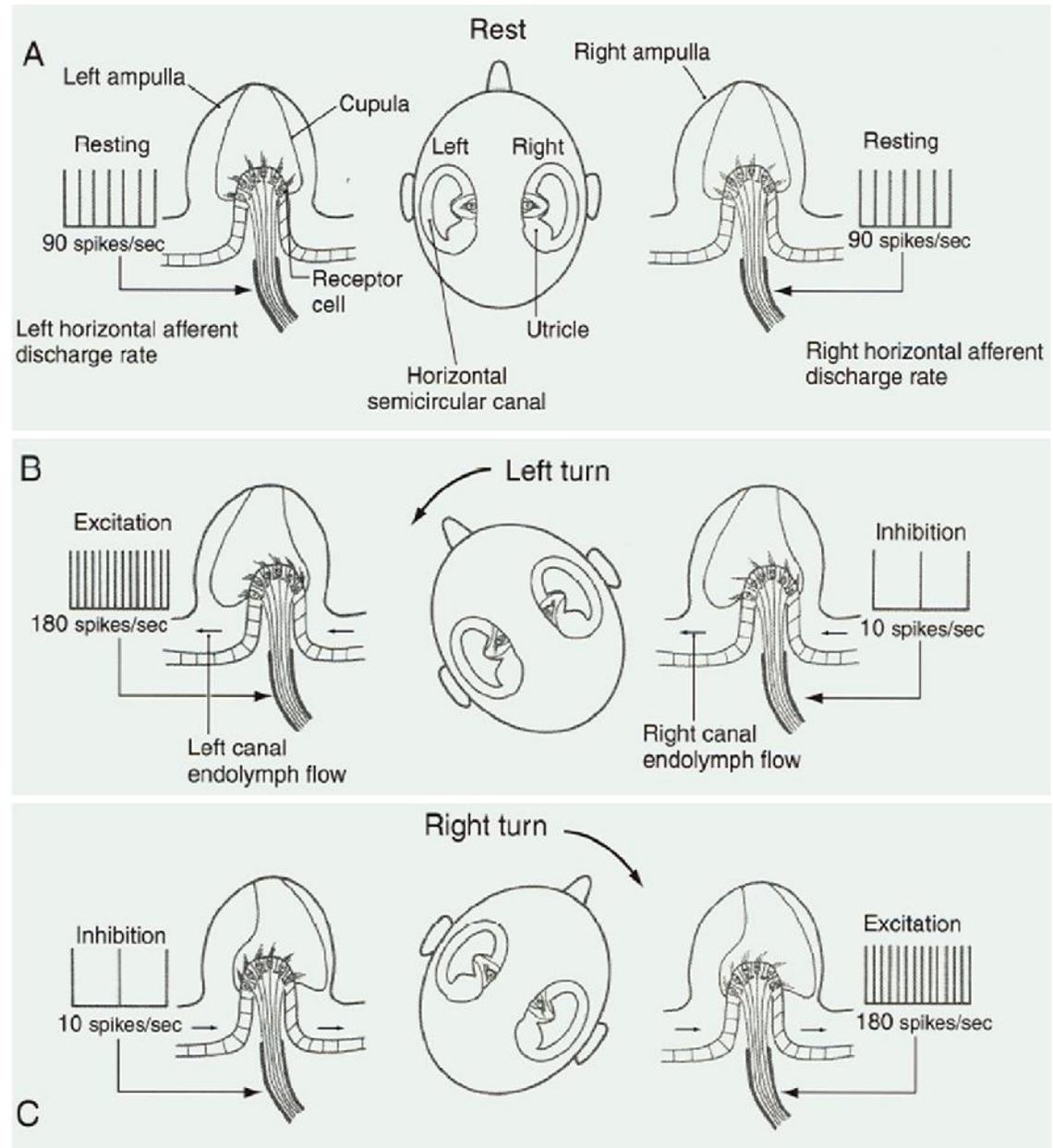
# I recettori vestibolari nei canali semicircolari e negli organi otolitici

## ■ Canali semicircolari

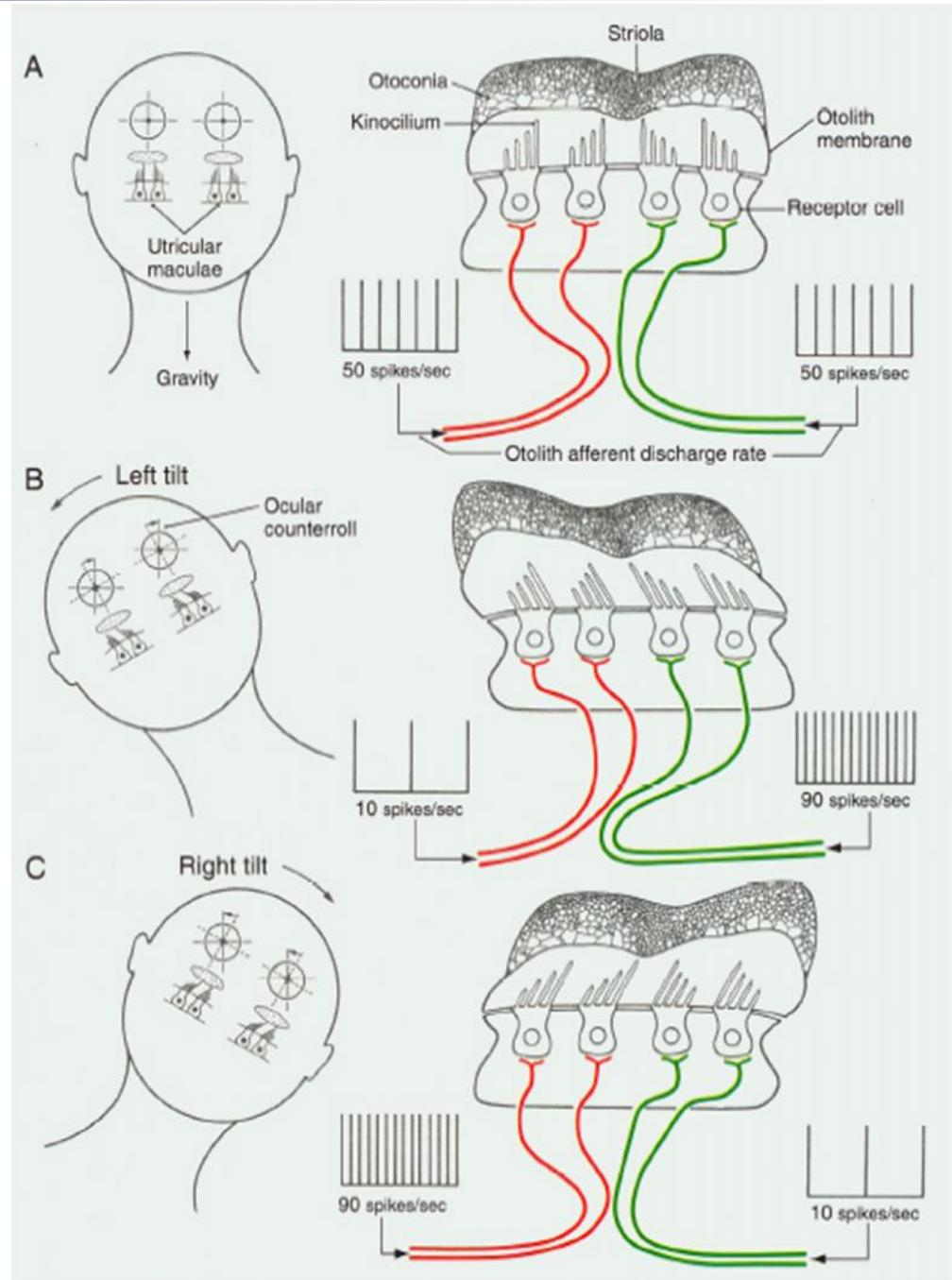
## ■ Organi otolitici



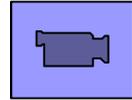
# Meccanismo di risposta dei canali semicircolari alle rotazioni della testa



# Meccanismo di risposta degli organi otolitici alle inclinazioni della testa



# Human Vestibular System



## Canals work in pairs.

The canals are arranged such that each canal has a partner on the other side of the head.

When one partner is maximally excited, the other is maximally inhibited.

This is called push-pull organization.

When the head rotates rightward, excitation occurs in the right horizontal canal on the right side of the head and inhibition occurs in the left.

The anterior canal on one side and the posterior on the other also form push-pull pairs.



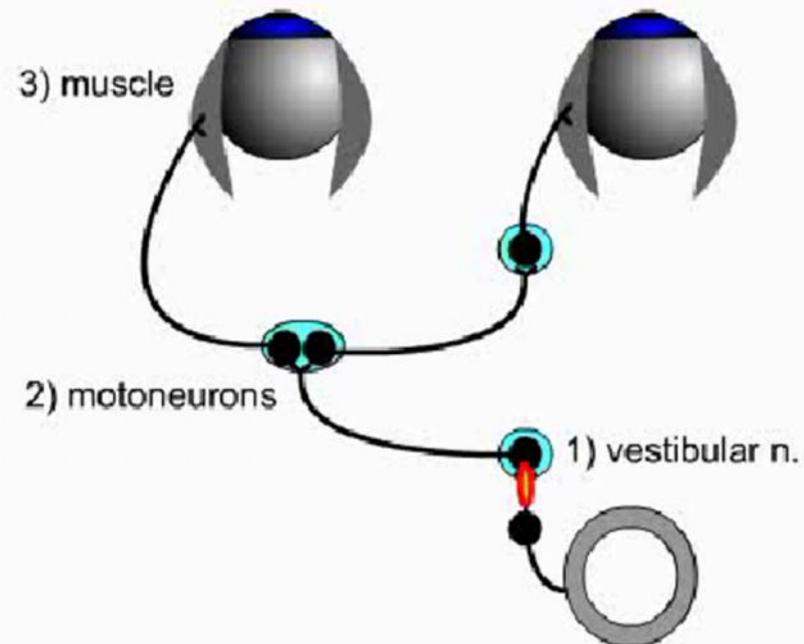
Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End



# Il Riflesso Vestibulo-Oculare (VOR)

Explain the neural mechanism for a horizontal VOR.

The direct path is a short reflex with 3 synapses.



Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End



# II Riflesso Vestibulo-Oculare (VOR)

Explain the neural mechanism for a horizontal VOR.

When the head rotates rightward the following occurs.

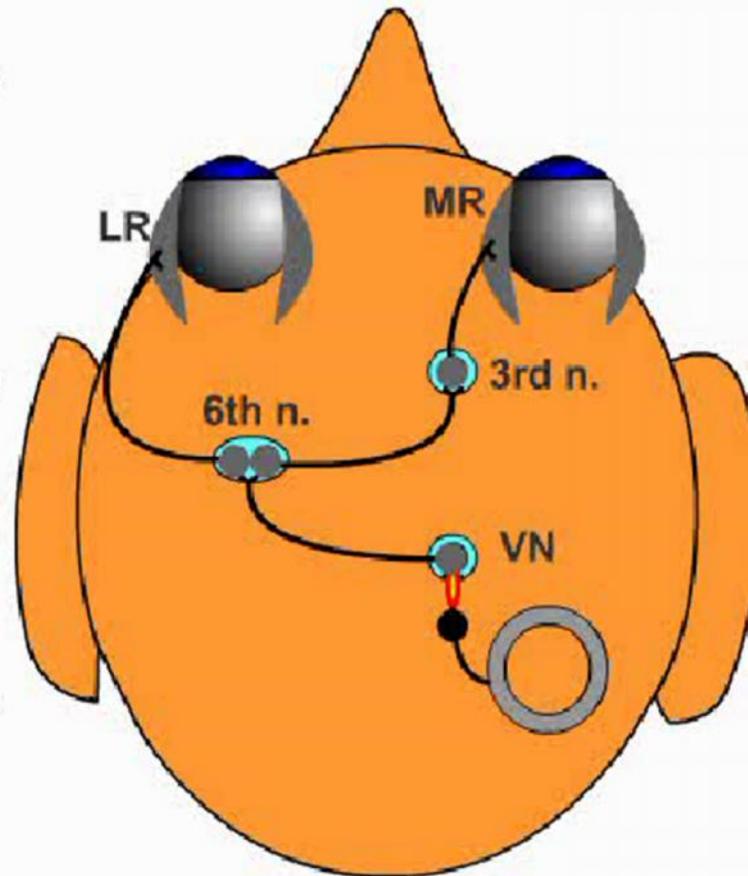
The right horizontal canal hair cells depolarize.

The right vestibular nucleus (VN) firing rate increases.

The motoneurons (in the right 3rd and left 6th nuclei) fire at a higher frequency.

The left lateral rectus (LR) extraocular muscle and the right medial rectus (MR) contract.

Both eyes rotate leftward.



Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End



# II Riflesso Vestibulo-Oculare (VOR)

Explain the neural mechanism for a horizontal VOR.

The VOR is a push-pull reflex.  
Neurons on other side do the opposite.

When the **head rotates rightward** the following occurs.

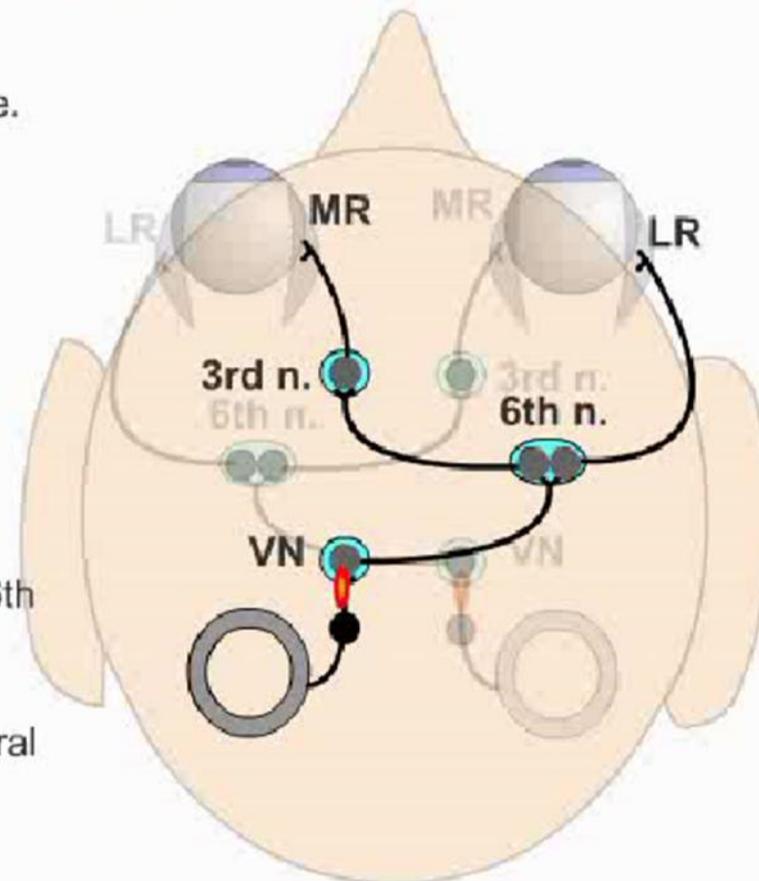
The left horizontal canal hair cells hyperpolarize.

The left vestibular nucleus firing rate decreases.

Motor neurons in the left 3rd and right 6th nuclei fire at a lower frequency.

The left medial rectus and the right lateral rectus relax.

This helps the **eyes rotate leftward**.



Start Labyrinth Otoliths Canals VOR Dizzy Plasticity End





# Sommario della lezione

- Il sistema vestibolare nell'Uomo:
  - Funzioni e ruolo del sistema vestibolare nell'Uomo
  - Anatomia e neurofisiologia del sistema vestibolare
- **Sistemi vestibolari artificiali**
  - **Dispositivi sensoriali funzionalmente analoghi:**
    - accelerometri
    - giroscopi
- Possibili applicazioni dei sistemi vestibolari artificiali in biorobotica

# Quantità cinematiche

## ■ Posizione

□  $x(t); \theta(t)$

$$\frac{d}{dt} \quad \int dt$$

## ■ Velocità

□  $v(t); \omega(t)$

$$\frac{d}{dt} \quad \int dt$$

## ■ Accelerazione

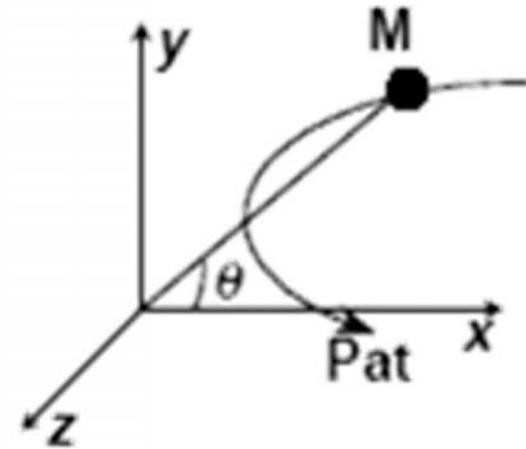
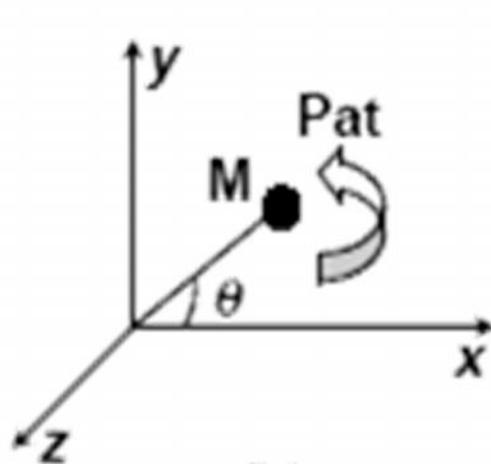
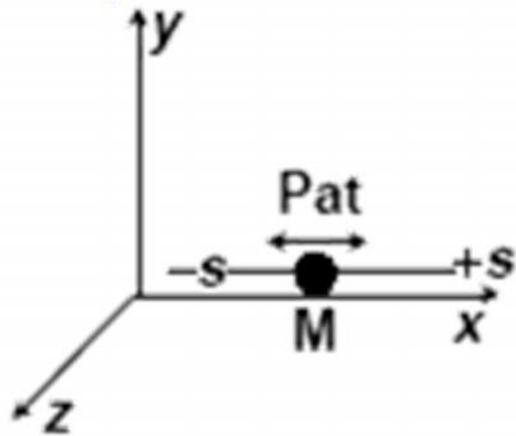
□  $a(t); \alpha(t)$

$$\frac{d}{dt} \quad \int dt$$

## ■ Jerk

□ ...

# Tipi di moto



■ Rettilineo:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(ds/dt)}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}$$

■ Angolare:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d(d\theta/dt)}{dt} = \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

■ Curvilineo:

$$\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}\mathbf{i} + \frac{d^2y}{dt^2}\mathbf{j} + \frac{d^2z}{dt^2}\mathbf{k}$$

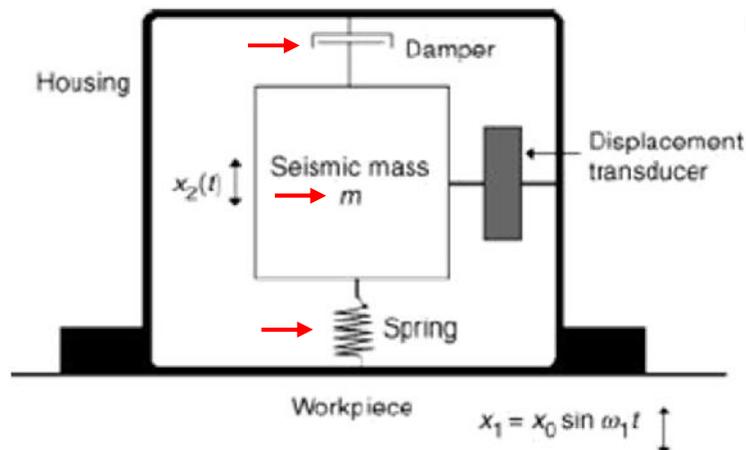


# Misura dell'accelerazione

- Metodi DIRETTI: si utilizzano **accelerometri**
  - Preferibili in caso di moti rettilinei o angolari
- Metodi INDIRETTI: si deriva la velocità
  - Preferibili in caso di moti curvilinei

# Principio di funzionamento generale tipico degli accelerometri

- La vibrazione è un fenomeno meccanico caratterizzata da un moto oscillatorio periodico attorno a una posizione di riferimento



- Un accelerometro è un dispositivo costituito da:

- Massa  $m$  (*seismic mass*)
- Elemento di supporto con caratteristiche elastiche (*springlike system*)
- Elemento smorzatore (*damper*)

- Capace di rilevare le forze esterne (compresa  $E_{gravità}$ ) agenti sul sistema attraverso l'inerzia della massa interna sottoposta all'accelerazione e spostata proporzionalmente dalla posizione di riposo

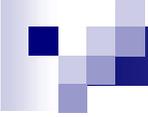
- Un sensore traduce lo spostamento in segnale elettrico acquisibile dal sistema di misura

$$f(t) = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + kz = mg \cos(\alpha) - m \frac{d^2 x_1}{dt^2}$$

$$z = x_2 - x_1$$

$\alpha$  = angolo rispetto alla gravità



# Classificazione e Tecnologie per accelerometri

Classificazione degli accelerometri sulla base del principio di funzionamento del sensore usato per la rilevazione dello spostamento

## **Principali Tecnologie**

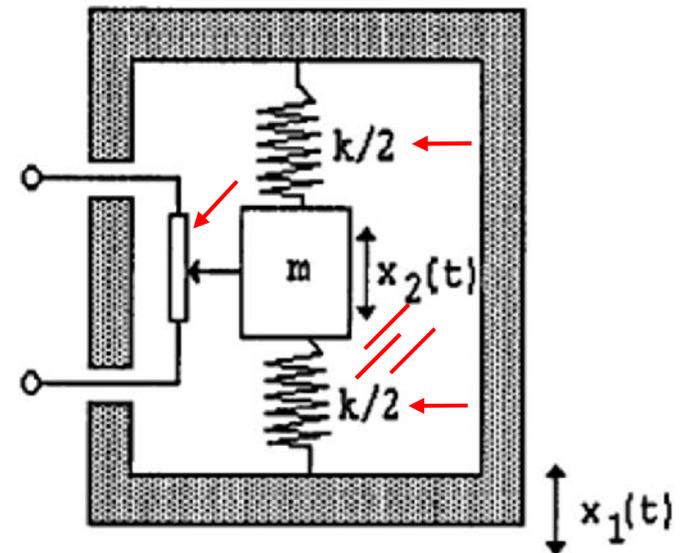
- Inerziali e meccaniche
- Piezoelettriche
- Piezoresistive: accelerometri a Strain - Gauges
- Capacitive
- Induttive (LVDT)
- Micro- e nano-fabbricazione

# Accelerometri Meccanici

- Sistema Massa - Molla - Smorzatore + sistema meccanico per la trasduzione esterna

## Accelerometro Potenzimetrico

- La massa sismica è fissata alla struttura con due molle
  - L'elemento smorzatore (*damper*) è costituito da un liquido viscoso che interagisce con la massa in movimento
  - Il potenziometro fissato alla massa tramite uno dei terminali legge gli spostamenti come una variazione della resistenza
- Bassa frequenza di operazione (< a 100 Hz)
    - Soprattutto per le accelerazioni con variazioni lente e vibrazioni a bassa frequenza
  - Range dinamico tipico:  $\pm 1g$  to  $\pm 50g$  fs.
  - Frequenze naturali: 12 - 89 Hz,
  - Rapporto di smorzamento : 0.5 - 0.8
  - Resistenza del potenziometro: 1000–10000 $\Omega$ 
    - Risoluzione corrispondente: 0.45–0.25% fs.
  - Sensibilità cross-assiale:  $< \pm 1\%$ .
  - Accuratezza:  $\pm 1\%$  fs a temperatura ambiente
  - Dimensioni: 50mm<sup>3</sup> (<0.1 gr.)



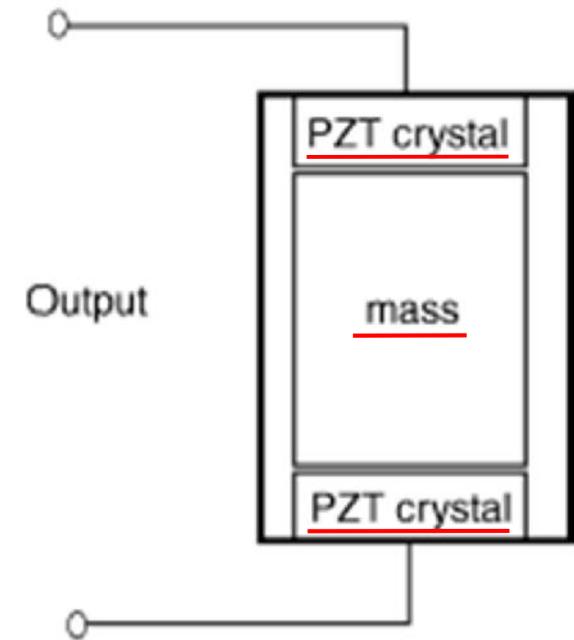
# Accelerometri Piezoelettrici

*Effetto Piezoelettrico: generazione di una differenza di potenziale con flusso di cariche ai capi di un cristallo sottoposto a stress meccanico*

## ■ Massa Sismica a contatto diretto con Cristallo Piezoelettrico

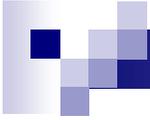
- Il cristallo, o altro elemento piezoelettrico, funziona sia da sensore che da elemento elastico di supporto alla massa
- La forza esterna causa uno spostamento della massa che agisce comprimendo il cristallo
- La compressione del cristallo induce direttamente la produzione di un segnale elettrico proporzionale

**conversione diretta di energia meccanica in energia elettrica**



$$Q_s|_{V=const} = d_{ij} F = d_{ij} ma$$

**F** : forza agente sul sistema  
**d<sub>ij</sub>** : costante piezoelettrica  
**Q<sub>s</sub>** : carica generata



# Accelerometri Piezoelettrici

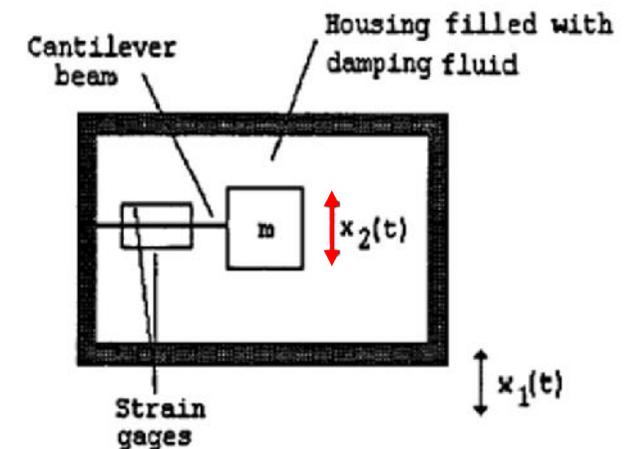
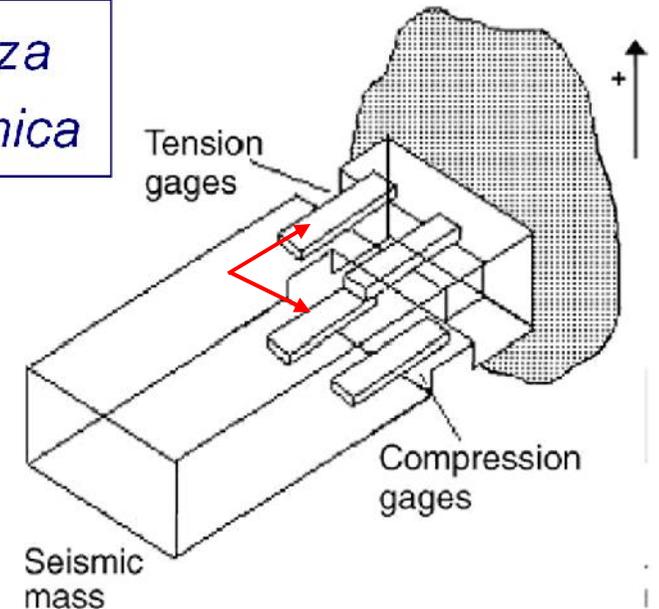
## ■ Caratteristiche

- Elevata linearità
- Utili soprattutto per applicazioni ad alte frequenze (*f lavoro* 2Hz - 5 KHz)
- Dimensioni ridotte (3 x 3 mm, ~ 0.5 g, cavi inclusi)
  - Strutture miniaturizzate integrate: anima in silicone e deposito di un sottile strato di titanato conduttivo
- Ampio range di temperature (fino a 120°)
- Resistenza a radiazioni (applicazioni in reattori nucleari)
- Buona reiezione al rumore
- Non rilevano accelerazioni continue o statiche
- Elementi sensibili: Cristalli di Quarzo o Ceramiche Conduttive (Titanato di Bario, Zirconite Titanato conduttivo - PZT, Metaniobite conduttiva)

# Accelerometri Piezoresistivi

*Effetto Piezoresistivo: variazione della resistenza elettrica in seguito ad una deformazione meccanica*

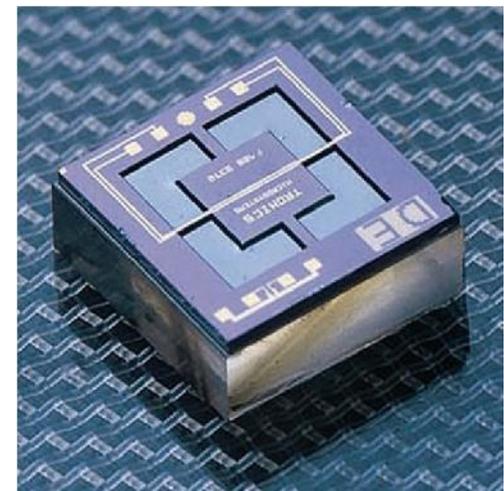
- **Massa Sismica connessa ad un sostegno elastico con Strain-Gauge e fluido viscoelastico come smorzatore**
  - Gli strain-gauge sono fissati ai lati dell'elemento elastico
  - Lo *strain* misurato è direttamente connesso all'ampiezza e al rate di spostamento e quindi all'accelerazione
  - Il segnale di output è acquisito da un sistema connesso a un apposito circuito (ponte di wheatston)



# Accelerometri Piezoresistivi

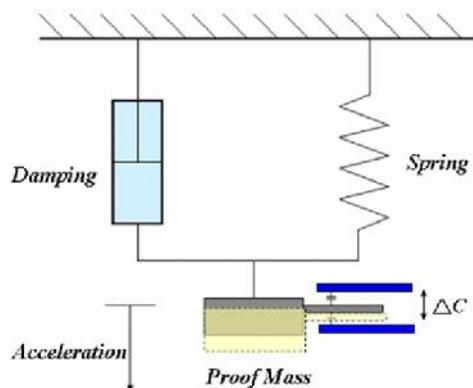
## ■ Caratteristiche

- Si usano semiconduttori con elevato fattore di gauge
- La sensibilità del sensore è legata alla risposta elastica della struttura e alla resistività del materiale
- Utili soprattutto per applicazioni a basse frequenze (*f lavoro* 1Hz - 20 KHz)
- Frequenza naturale ~ 300 Hz
- Con buon design resistono fino a 10.000 g
- Utile microfabbricazione integrata per uniformare caratteristiche degli strain-gauge al sistema (resistenza a T°)
- Leggeri: 1 – 10 g

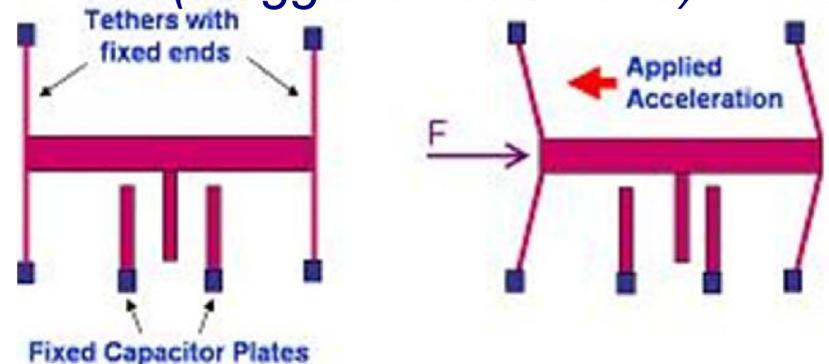


# Accelerometri Capacitivi

- **Massa Sismica costituita da una delle armature del condensatore**
  - La massa, realizzata con materiale conduttivo, è fissata al supporto elastico (tipicamente una membrana)
  - L'altra armatura è realizzata sul supporto fisso (*housing*) nelle immediate vicinanze
  - Un apposito circuito rileva la capacità del condensatore e genera un segnale elettrico proporzionale allo spostamento della massa.

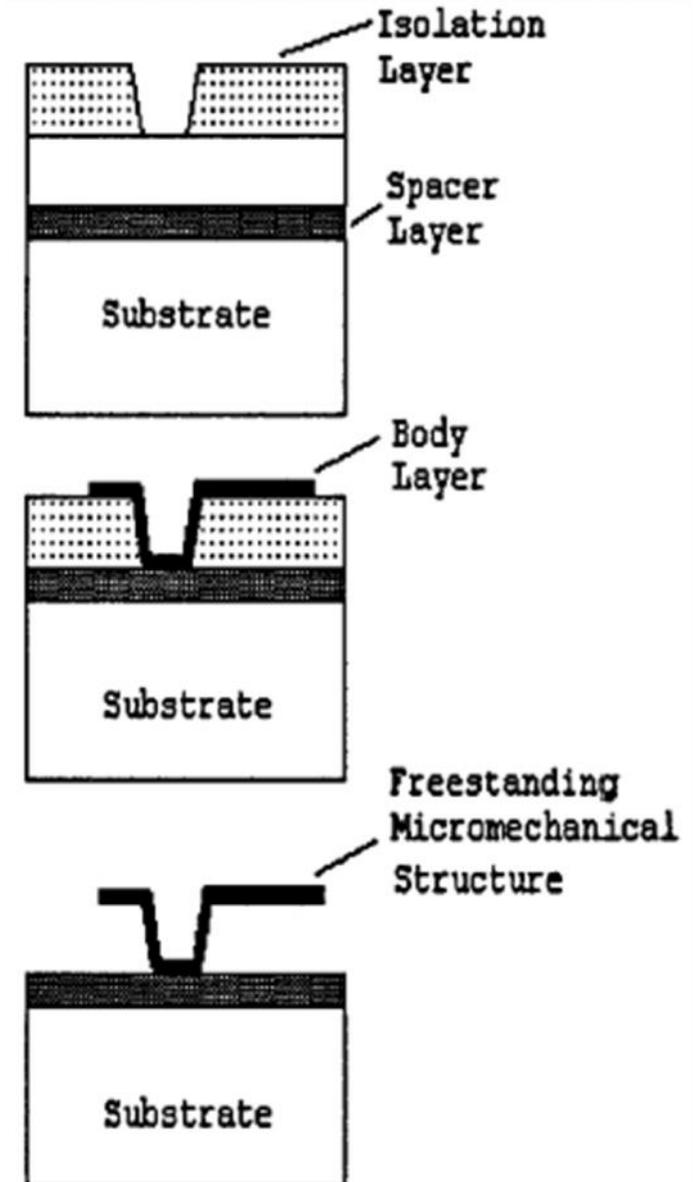


*Accelerometro Capacitivo Differenziale  
(maggiore risoluzione)*



# Micro-accelerometers

- Utilizzo di tecnologia di circuiti integrati (IC) per la fabbricazione di strutture elettromeccandiche 3D
- Primo accelerometro: 1979
- Si sfruttano le proprietà della struttura cristallina del silicio per ottenere stabilità e robustezza
- Etching di film depositati su wafer di silicio
- Possibilità di integrare su un singolo chip più accelerometri in modo da misurare le accelerazioni nello spazio 3D ( $\underline{a}_x$ ,  $\underline{a}_y$ ,  $\underline{a}_z$ )
- Misurazione degli spostamenti con tecnologie capacitive, piezoelettriche o piezoresistive e tecnologia CMOS

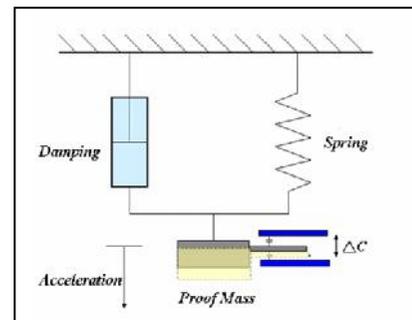
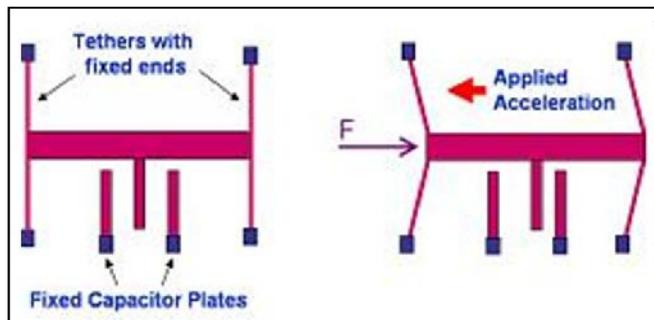


## Practical examples: *Nintendo Wii*

The Wii Remote has the ability to sense acceleration along three axes through the use of an ADXL330 accelerometer



The sensor is a polysilicon surface micromachined structure built on top of a silicon wafer. Polysilicon springs suspend the structure over the surface of the wafer and provide a resistance against acceleration forces. Deflection of the structure is measured using a differential capacitor that consists of independent fixed plates and plates attached to the moving mass. Acceleration deflects the moving mass and unbalances the differential capacitor resulting in a sensor output whose amplitude is proportional to acceleration.



# Misura della velocità

## ■ Metodi basati su un riferimento

- Misure effettuate sia sull'oggetto in movimento che su un riferimento
- Si misura la velocità media

$$v_{avg} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

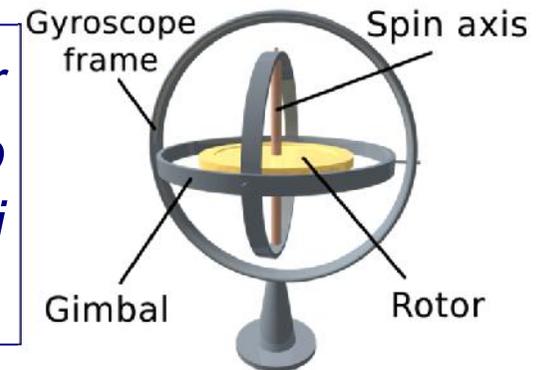
## ■ Metodi inerziali

- Non richiedono il contatto con un riferimento
- Si misura la velocità relativa alla velocità iniziale del sensore

$$v(t) = v_i + \int_{t_i}^t a(\tau) d\tau$$

# Giroscopi per la misura della velocità angolare

*Il giroscopio è un dispositivo fisico rotante che, per effetto della legge di conservazione del momento angolare, tende a mantenere il suo asse di rotazione orientato in una direzione fissa*

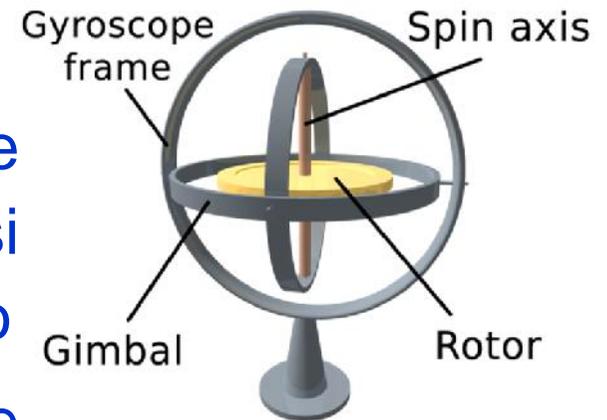


## ■ Caratteristiche fondamentali del sistema

- Elevata inerzia e permanenza dell'asse di rotazione: *una volta messo in rotazione, in assenza di forze esterne, tende a mantenere fissa nello spazio la direzione del suo asse di rotazione*
- **Precessione:** *movimento dovuto all'azione congiunta della forza applicata per mutare la direzione dell'asse e del momento angolare, l'asse tende a disporsi lungo la direzione perpendicolare al piano individuato dalla forza applicata e dall'asse medesimo descrivendo un cono ideale*

# Principio di funzionamento generale tipico dei giroscopi

- Un giroscopio è un dispositivo costituito da:
  - Rotore a forma di toroide che ruota attorno al proprio asse (*Spin axis*)
  - Sospensione cardanica (*Gimbal*) che permette al rotore di orientarsi liberamente nelle tre direzioni dello spazio
  - Se il rotore è in rotazione il suo asse tende a mantenersi orientato nella stessa direzione anche se il supporto cambia orientamento

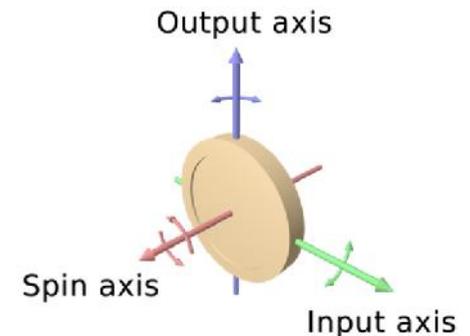
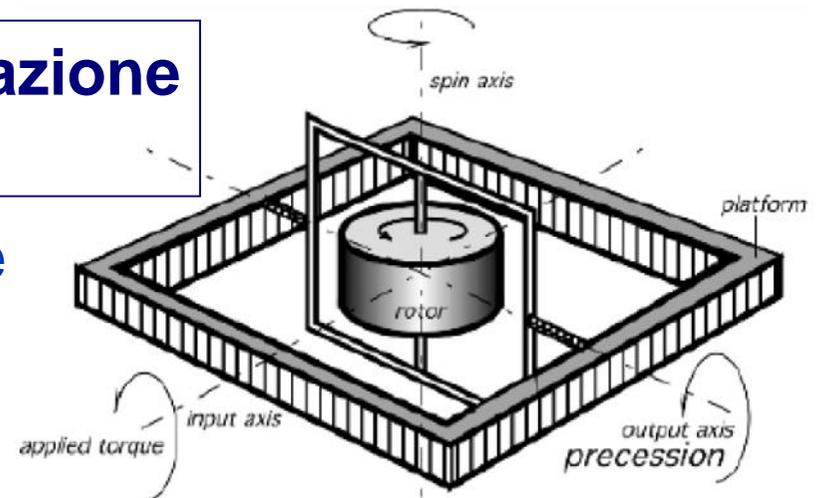


(meccanismo inventato nel 1852 dal fisico Jean Bernard Léon Foucault nell'ambito dei suoi studi sulla rotazione terrestre)

# Giroscopio meccanico rotante

**Basato sul principio di conservazione del momento angolare**

- Un disco (rotore) è libero di ruotare rispetto a uno/due assi di *spin* (giroscopio a 1/2 DOF)
- Se viene applicata una rotazione al supporto del giroscopio attorno all'asse di *input*, il giroscopio viene spinto a ruotare attorno a un'asse perpendicolare (di *output*)
- Il giroscopio può generare un segnale in uscita proporzionale alla velocità angolare di un'asse perpendicolare all'asse di *spin*



$$T = I\check{S}\Omega$$

**T** : torsione applicata

**I**: inerzia

**Š**: velocità rotore mantenuta costante

**h**: velocità angolare intorno all'asse di output



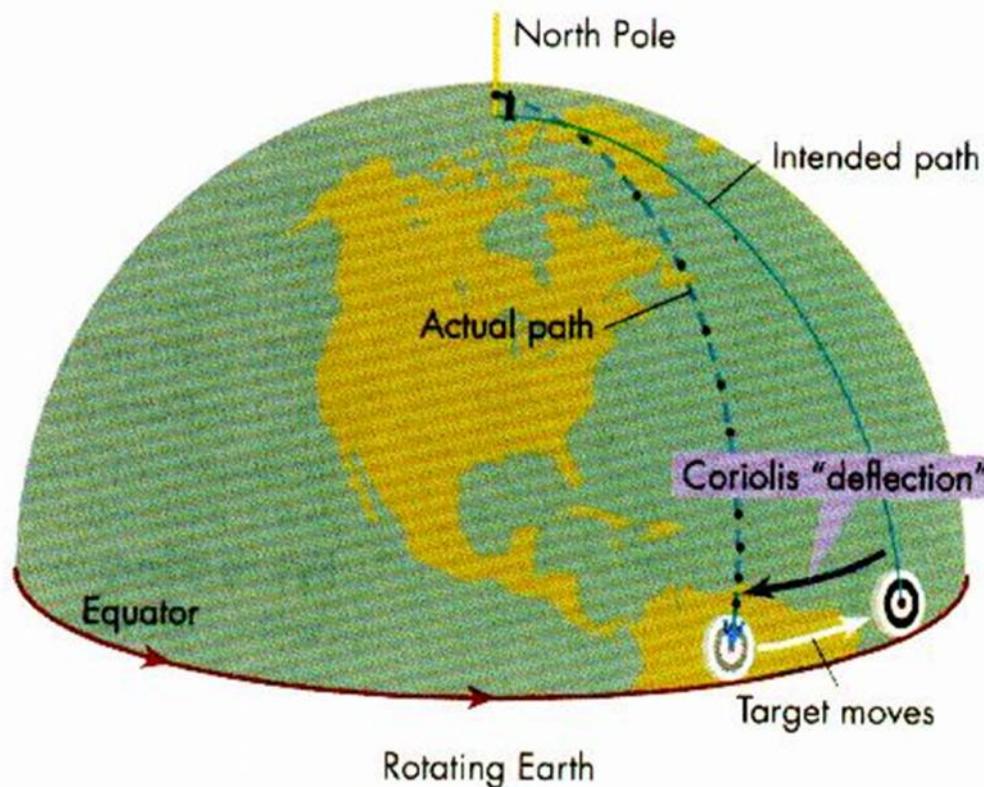
# Giroscopio meccanico rotante

- L'accuratezza dipende dalla presenza di effetti che possono aggiungere rotazioni aggiuntive indesiderate e causa di drift (es. attrito, rotori sbilanciati, campi magnetici)
  - Sospensione del rotore in liquido viscoso ad alta densità (*fluorocarburi*): serve controllo per temperatura e deterioramento
  - Gas di supporto per la sospensione del rotore: elio, idrogeno o aria ad alta pressione
  - **Giroscopi Elettrostatici**: rotore sospeso nel vuoto applicando un campo elettrico
  - **Giroscopi Magnetici o Cryogenici**: il sistema viene raffreddato con cryogeno e il rotore (superconduttore) viene mantenuto sospeso con l'applicazione di campo magnetico
- Limiti di riduzione del costo
- Limiti per la Miniaturizzazione

# Effetto Coriolis

(effetto descritto nel 1835  
dall'ingegnere e matematico francese  
Gustave-Gaspard Coriolis)

La Forza di Coriolis è una forza apparente, a cui un corpo risulta soggetto quando si osserva il suo moto da un sistema di riferimento che sia in moto circolare rispetto a un sistema di riferimento inerziale.



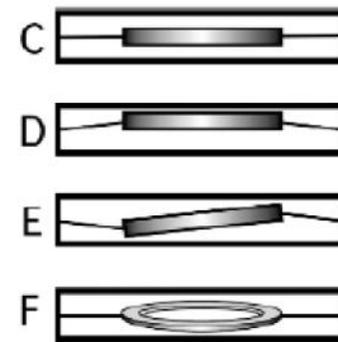
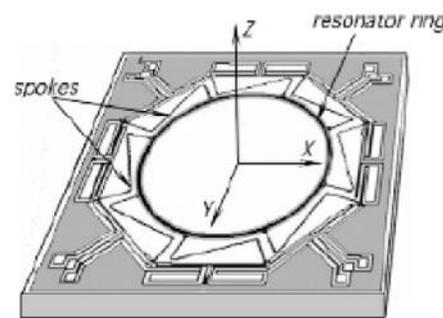
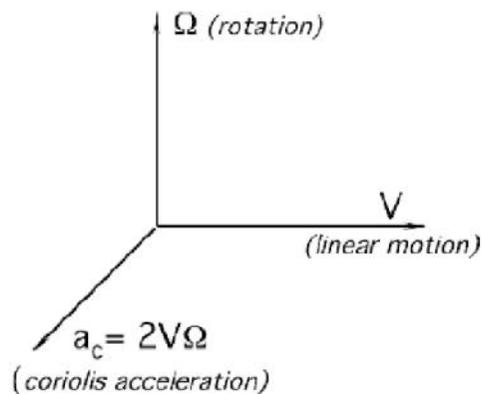
La formula matematica che esprime la **forza di Coriolis** è la seguente:

$$\vec{F}_C = 2m(\vec{v} \times \vec{\omega})$$

$\vec{F}_C$  è la forza di Coriolis,  
 $m$  è la massa,  
 $\vec{v}$  è la velocità lineare,  
 $\vec{\omega}$  è la velocità angolare del sistema in rotazione

# Giroscopi basati sull'accelerazione di Coriolis

**MEMS con elemento vibrante (Quarzo), al posto del rotore, che viene fatto muovere linearmente di moto armonico**



- L'accelerazione di Coriolis si manifesta in un corpo quando si muove linearmente in un sistema di riferimento che ruota attorno ad un'asse perpendicolare a quella del moto lineare
- L'accelerazione risultante, direttamente proporzionale alla velocità di rotazione, si genera in direzione del terzo asse perpendicolare al piano definito dagli altri due

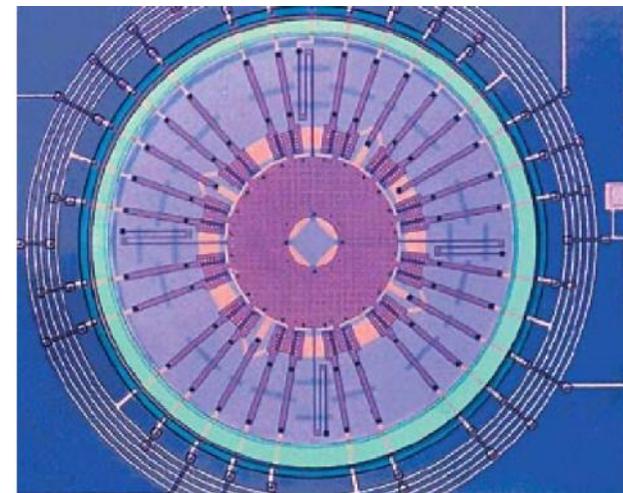
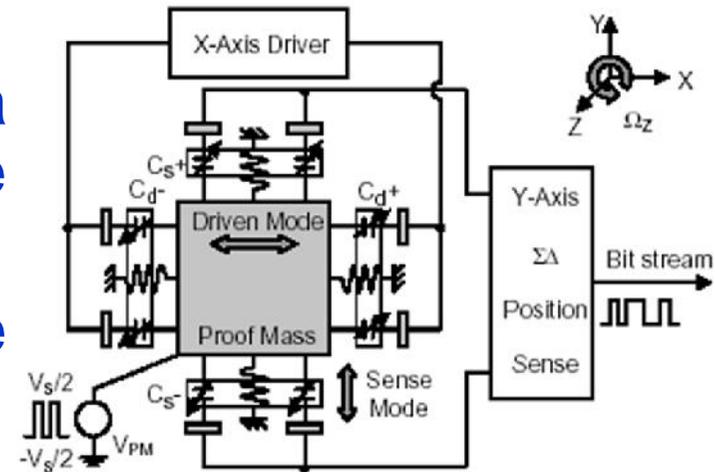
# Giroscopi basati sull'accelerazione di Coriolis

- L'elemento vibrante genera una seconda vibrazione in direzione perpendicolare alla prima
- Misurando la vibrazione indotta è possibile ottenere il grado di rotazione

## ■ Caratteristiche

- Maggiore robustezza
- Miniaturizzazione
- Produzione su larga scala e in ambienti particolari (applicazioni aerospaziali, militari, marine, ...)

*A polysilicon surface-micromachined vibrating wheel gyro, designed at the Berkeley Sensors and Actuators Centre*



## Practical examples: *xsens*

The MTi is a miniature size and low weight 3DOF Attitude and Heading Reference System (AHRS).



- **3D Gyroscopes**
- **3D Accelerometers**
- **3D Magnetometers**

The gyroscopes are used to calculate orientation. Integration drift is inevitable whilst using gyroscopes. To compensate for drift completely, the MTi corrects its orientation every sample using the gravity and the earth magnetic field as reference vectors.

**MTi**

short movie

Miniature Attitude and  
Heading Reference System