

**Paolo Mascheretti**

*Dipartimento di Fisica "A. Volta"*

*Università degli Studi di Pavia*

Appunti grafici sul tema:

**La correlazione  
tra posizione e tempo  
nelle onde: dai modelli...  
all'utilizzo  
da parte degli animali**

## A. ONDE & OSCILLAZIONI

Un'onda che si propaga in un mezzo materiale (nell'aria, nell'acqua, nelle rocce, sulla superficie dell'acqua, ecc.) o in un sistema materiale (albero motore, ponte sospeso, ecc.) è una forma di moto collettivo nel quale oscillatori identici, distribuiti uniformemente nello spazio, compiono oscillazioni (attorno a punti di equilibrio) opportunamente sfasate da oscillatore a oscillatore.

Esistono tanti tipi di onde quanti sono i tipi di oscillatori.

Caratteristica importante di un oscillatore è il suo **periodo**, cioè il tempo **T** necessario per compiere una oscillazione completa. La **frequenza** è il numero di oscillazioni compiute in un secondo:  $f = 1/T$ .

Se tra due oscillatori coinvolti in un'onda, distanti  $\Delta x$  c'è uno sfasamento  $\Delta t$ , la **velocità di propagazione** dell'onda risulta:

$$V = \Delta x / \Delta t.$$

Lo sfasamento pari al periodo di oscillazione  $T$  caratterizza due oscillatori che distano tra loro di una **lunghezza d'onda  $\lambda$** . La velocità di propagazione si può così esprimere come  $V = \lambda / T$  (oppure  $V = \lambda f$ ).

## **Alcuni tipi di oscillatori**

### **1: oscillatori elastici**

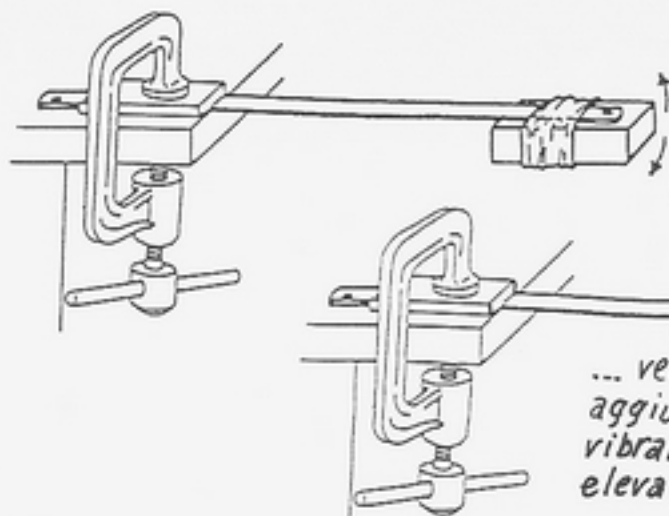
Sono costituiti da sistemi materiali sottoposti a forze di richiamo dovute a molle o altri sistemi elastici; **tanti sono i tipi di molle... tanti sono i tipi di oscillatori:**

### a) molla a elica-massa



*aumentando la massa,  
la frequenza diminui-  
sce; aumentando la  
rigidità della molla,  
la frequenza aumenta*

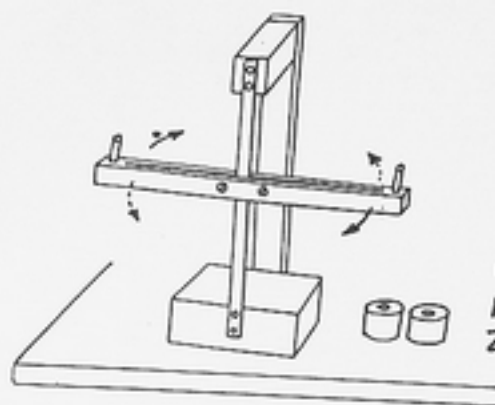
### b) molla a lamina di flessione



*aumentando la  
massa e/o la  
lunghezza della  
molla, la frequen-  
za diminuisce;*

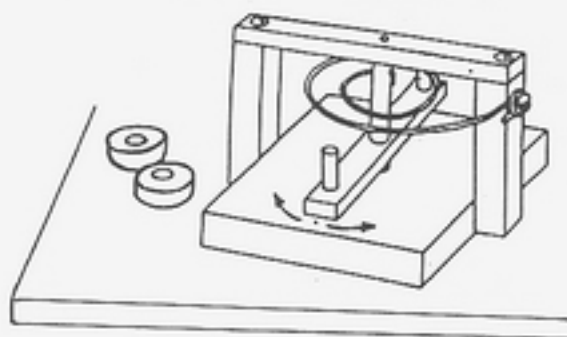
*... versione senza massa  
aggiuntiva: lamine corte  
vibrano con frequenza  
elevata...*

c) molla a lamina di torsione-braccio con masse aggiuntive



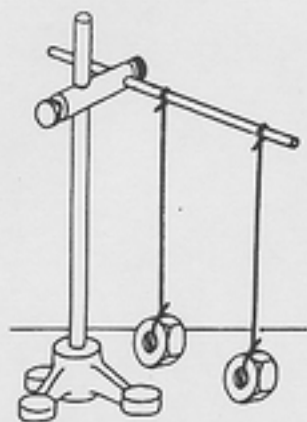
*aumentando la massa e/o la lunghezza del braccio oppure il valore delle masse e la loro distanza dalla lamina, si diminuisce la frequenza...*

d) molla a spirale - braccio ruotante (si possono aggiungere masse)



*masse grandi e/o lontane dall'asse di rotazione provocano la diminuzione della frequenza...*

## 2: anche i pendoli sono oscillatori



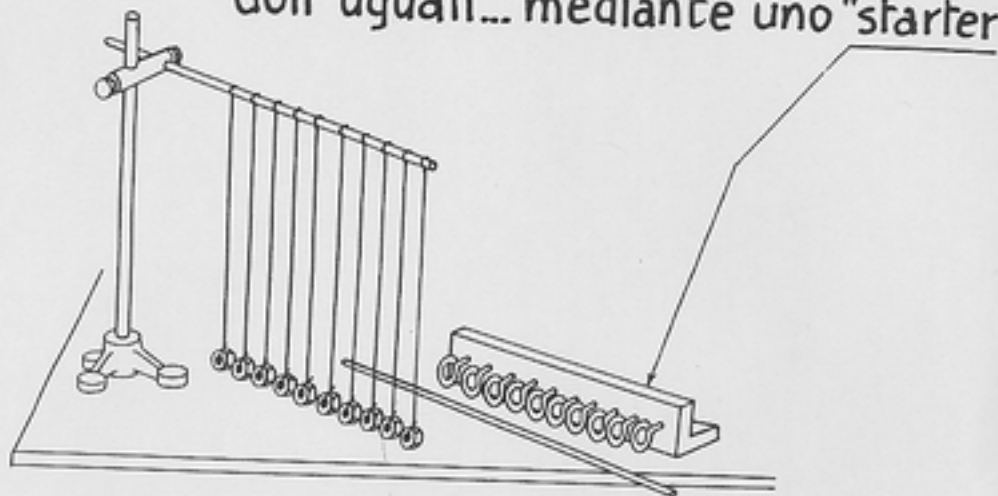
se il filo è abbastanza lungo rispetto alle dimensioni della massa, e le oscillazioni si mantengono di piccola ampiezza, la frequenza di oscillazione dipende solo dalla lunghezza del filo: diminuisce all'aumentare della lunghezza.

(pendoli corti hanno periodo breve; pendoli lunghi oscillano lentamente)

**Con due pendoli uguali si studiano facilmente alcuni valori dello sfasamento**

## Onde: due esempi

a1) ... generare onde in una fila di pendoli uguali... mediante uno "starter"



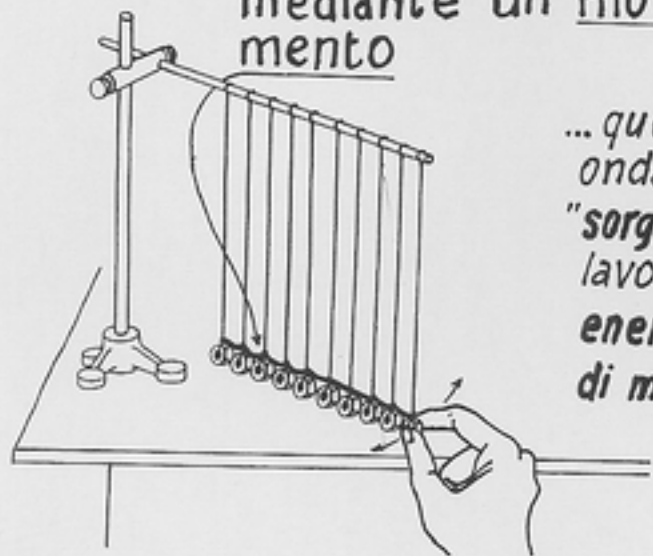
Il moto collettivo di questi pendoli **non** è una vera onda ma costituisce un modello puramente cinematico che realizza la correlazione tra posizione e tempo nelle onde fisiche (...le vere onde!).

Esso, tuttavia, consente di riconoscere che lo spostamento  $s$  di ogni pendolo dall'assetto di riposo, come funzione (armonica) della posizione  $x$  lungo la fila e del tempo  $t$  è del tipo

$$s(x, t) = s_0 \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

Se i pendoli interagissero (per esempio grazie a un sottile filo che li unisse oppure fossero così vicini da risentire l'azione dell'aria che ognuno di loro muoverebbe) l'onda si genererebbe anche senza lo starter: basterebbe eccitare il primo della fila!....

a2)... generare onde in una fila di pendoli uguali che interagiscono mediante un filo di accoppiamento



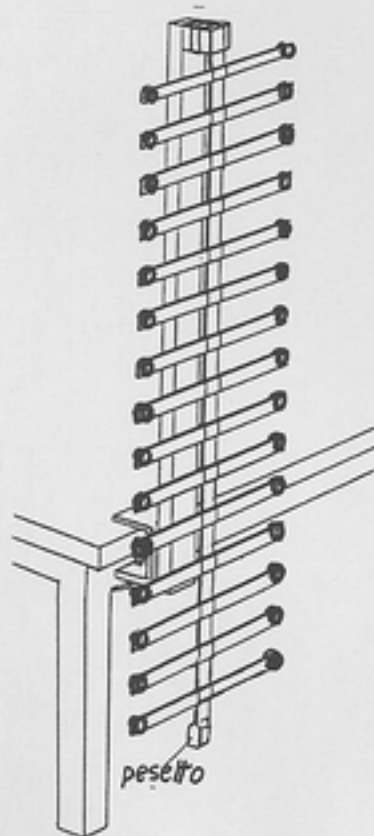
... questa é una vera onda "fisica": ha una "sorgente" (che compie lavoro...), trasmette energia e quantità di moto...

I vari tipi di onde dipendono dal particolare tipo di interazione che si stabilisce tra ogni oscillatore e i suoi vicini.



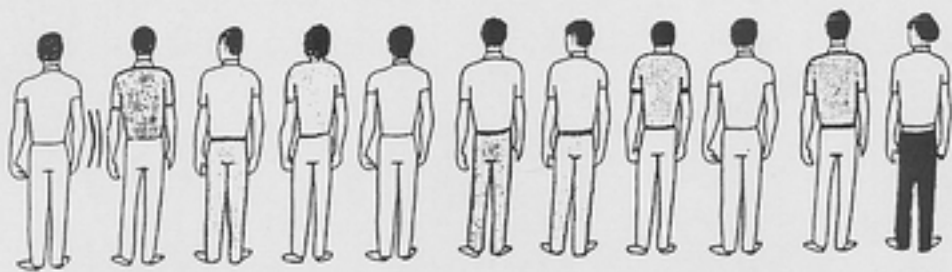
La frequenza dell'onda dipende dalla sorgente (è uguale alla frequenza della sorgente); dal mezzo in cui si propaga l'onda, dipende la velocità di propagazione (e, quindi, la lunghezza d'onda).

b) onde di torsione in una fila di oscillatori con molla a lamina di torsione



..imponendo al braccio inferiore di ruotare di un piccolo angolo attorno alla lamina, si provoca la propagazione di un'onda: l'onda, giunta al supporto superiore (che impedisce la torsione della lamina) si riflette ("torna indietro")

.. un modello "antropomorfo" di onda:  
una fila di ragazzi affiancati, pronti per  
iniziare una specie di gioco...

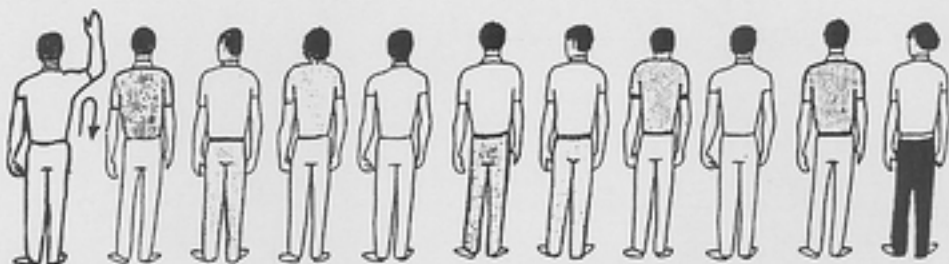


Il gioco inizia quando il primo della fila dà un colpetto sul braccio del compagno che gli sta a destra, poi ritorna nella posizione iniziale, con le braccia distese lungo i fianchi. Il compagno, dopo che ha ricevuto il colpetto, dà a sua volta un colpetto al compagno che gli sta a destra e così, uno alla volta, successivamente fino al termine della fila.

Lungo la fila si è propagato il **gesto** del primo ragazzo, proprio con le modalità con le quali si propagano i movimenti dei componenti coinvolti nella propagazione di un'onda.

Da notare che il gesto è diretto nella stessa direzione della fila, cioè nella stessa direzione di propagazione dell'onda: in questo caso si parla di "onda longitudinale".

Se il movimento è "alzare e abbassare la mano" (come nella figura seguente),



cioè trasversale rispetto alla direzione di propagazione dell'onda, questa si dice "onda trasversale".

I due esempi precedenti sono onde trasversali.

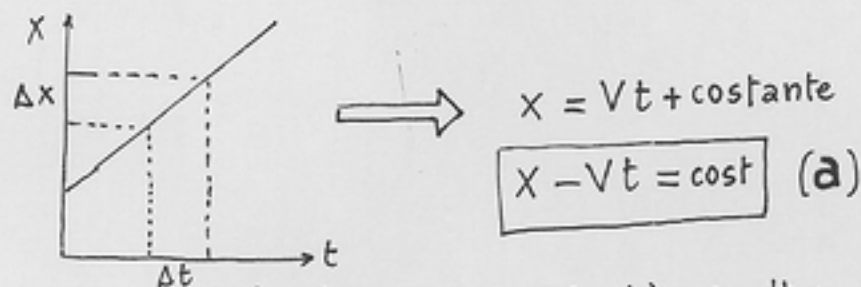
Onde longitudinali sono quelle che costituiscono il suono (dilatazioni e compressioni) nell'aria o nell'acqua.

"ognuno fa ciò che ha fatto un suo vicino (che lo precede) con un ritardo proporzionale alla distanza"

(La costante di proporzionalità è la "velocità" ( $V$ ) con cui si propaga "quello che si fa")

- In modo formale:  $s(x,t) = s(x+\Delta x, t+\Delta t)$   
con  $\Delta t = \frac{\Delta x}{V}$  o, anche  $\Delta x = V\Delta t$   
con  $V$  costante;

- Quale relazione tra  $x$  e  $t$  soddisfa la costanza della velocità di propagazione?



Dunque; la funzione  $s(x,t)$  risulta del tipo:  $s(x,t) = s(x-Vt)$

(il valore della costante è definito dalla funzione  $s(0,t)$  che caratterizza la sorgente dell'onda, posta in  $x=0$ )

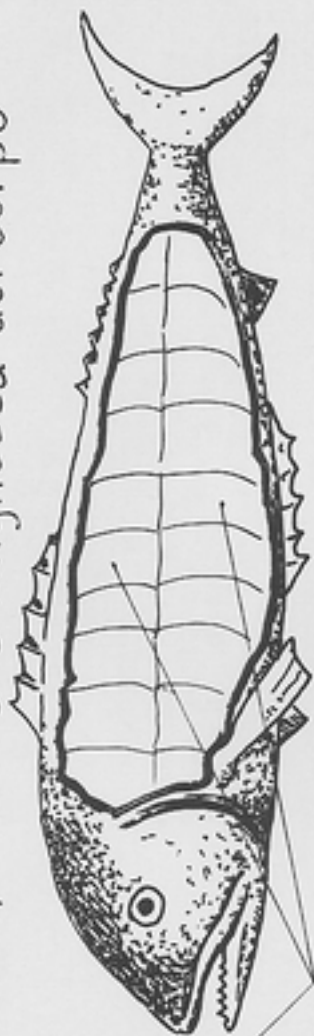
Se  $s(x,t)$  è armonica, tra i possibili valori di  $\Delta x$  e  $\Delta t$  ci sono anche i valori  $\Delta x = \lambda$  e  $\Delta t = T$ :

la (a) può così essere scritta:  $\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} = 0$ ,  
da cui

$$s(x,t) = s_0 \sin 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

# B.ONDE PER MUOVERSI: UN MODO MOLTO DIFFUSO IN TUTTI I TIPI ANIMALI

...onda per tutta la lunghezza del corpo



*i principali muscoli motori dei pesci*

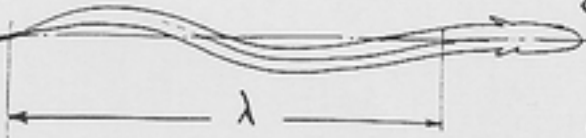


*il nuoto per onde*



### anguilliforme

tutto il corpo  
"ospita" onde:  
la pinna caudale  
è esigua  
(anguilla - murena...)



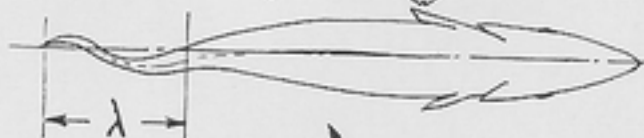
### sub-carangiforme

si realizza un'onda  
non completa  
che coinvolge  
soprattutto l'ampia  
pinna caudale  
(trota...)



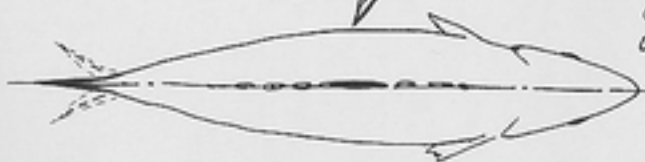
### carangiforme

un'onda completa  
è realizzata dalla  
sola pinna caudale,  
ampia e lunga  
(pesce pilota...)



### tunniforme

corpo rigido, pinna  
caudale falcata e  
rigida, con rapido  
brandeggio  
(tonni, pescespada...)



...vari stili in diverse specie...

*... onde lungo pinne a nastro*

**RAZZA**

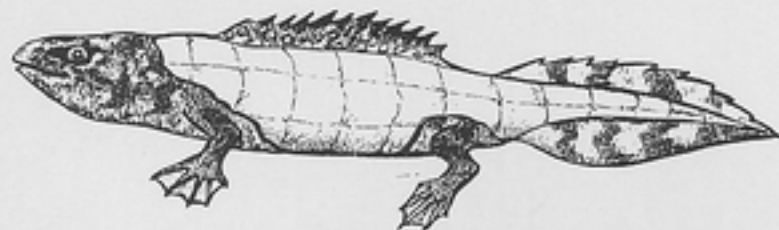


**SOGLIOLA**



*...anfibi e rettili: onde nella coda*

## TRITONE



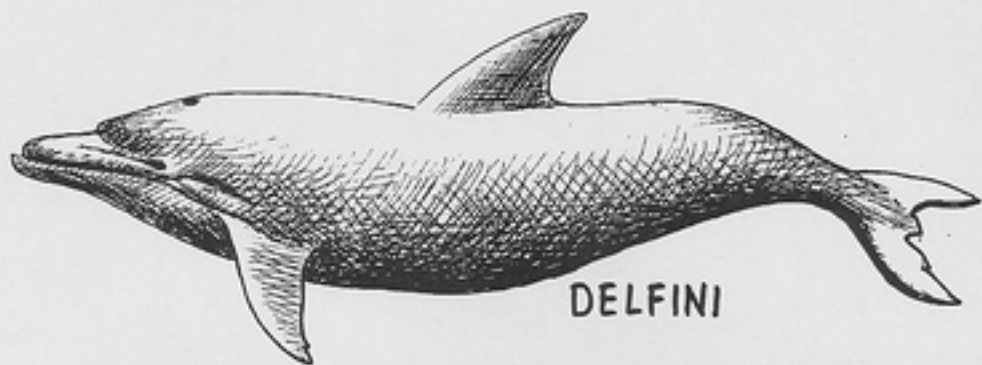
## COCCODRILLO



*(da una foto ripresa da un  
Subacqueo)*



*onde in mammiferi marini... e in  
molluschi cefalopodi...*



DELFINI



LONTRA

*... onde lungo nastri laterali*



CALAMARO



SEPPIA

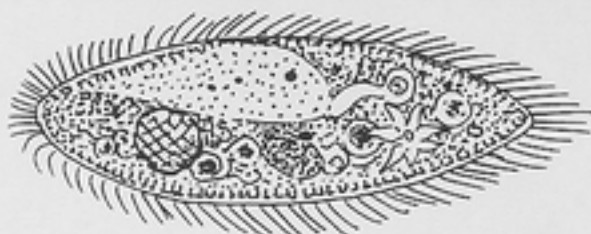
... onde lungo cilia e flagelli...



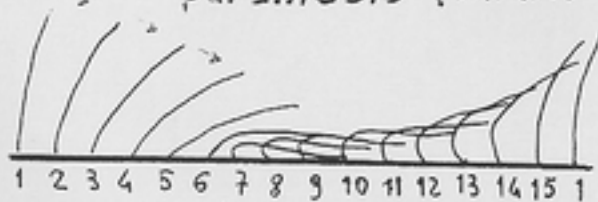
## GAMETOFITI SPERMATOZOI

## PROTOZOI

onda del battito ciliare

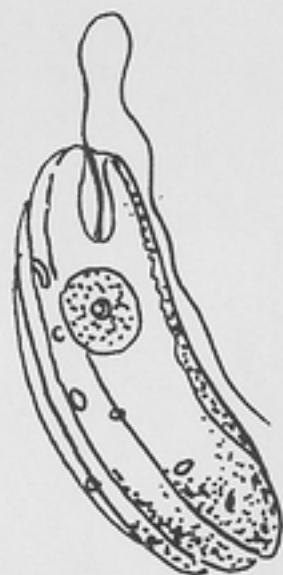


paramecio (ciliati)



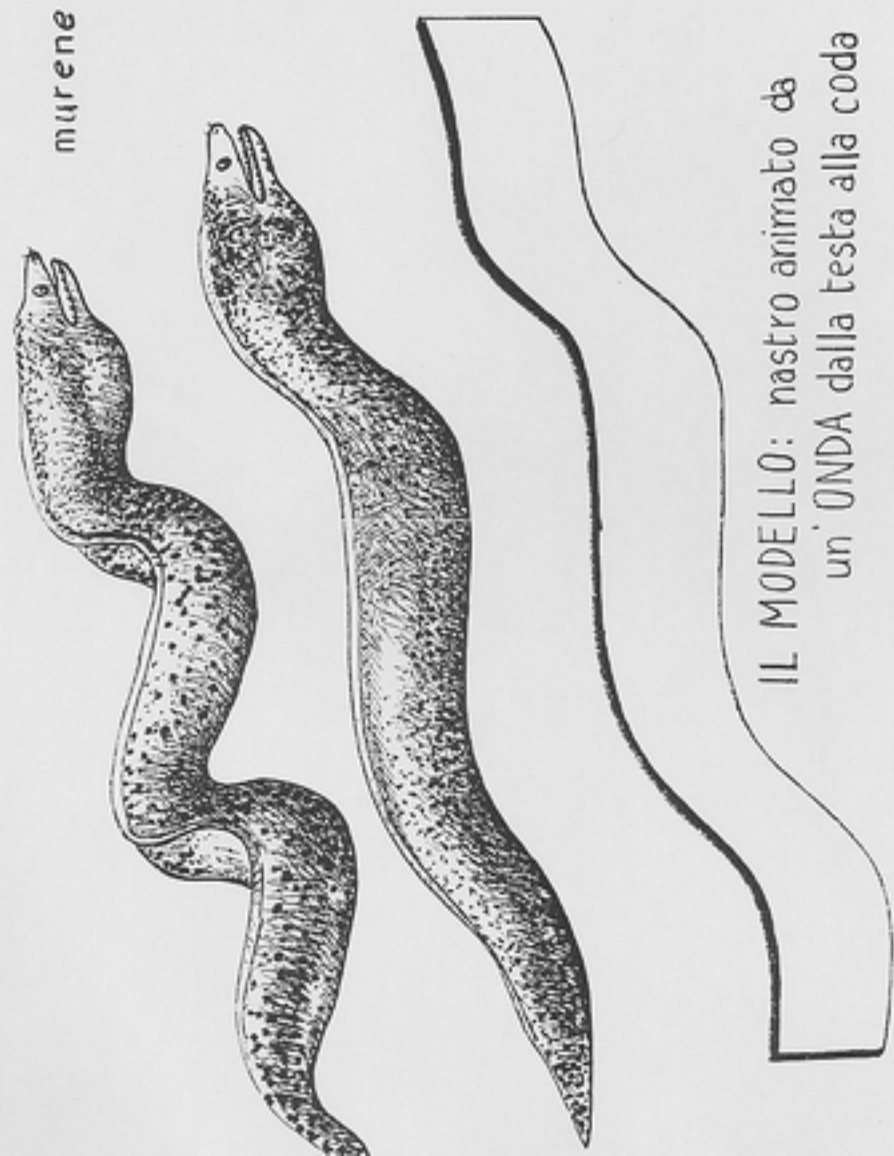
battito  
efficace

movimento di  
ritorno



(flagellati)

# .. il "segreto" dell'efficienza del nuoto "per onde"



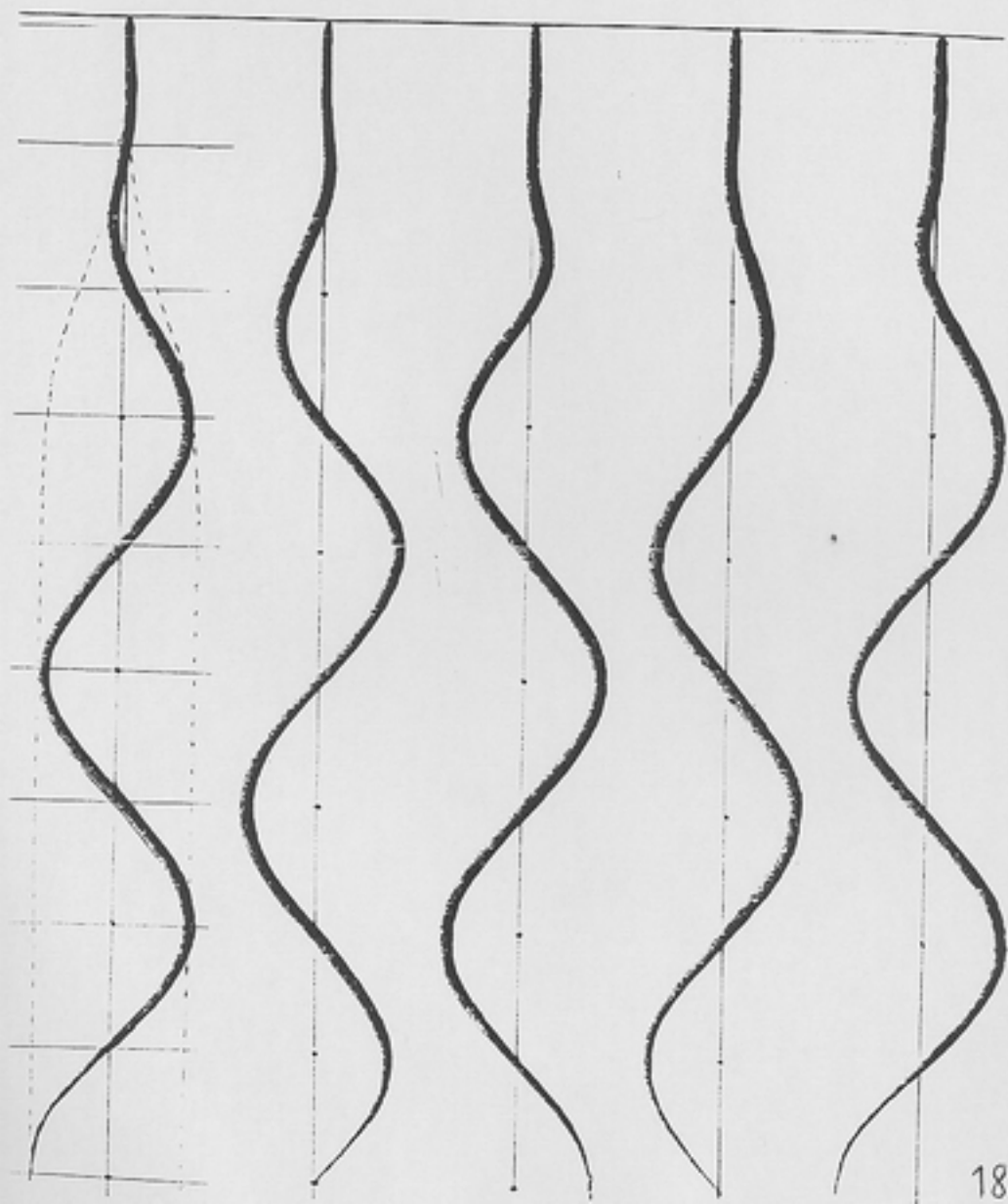
sequenze delle forme d'onda: l'onda si  
genera dietro la testa, che non compie sposta-  
menti trasversali

$t_1$

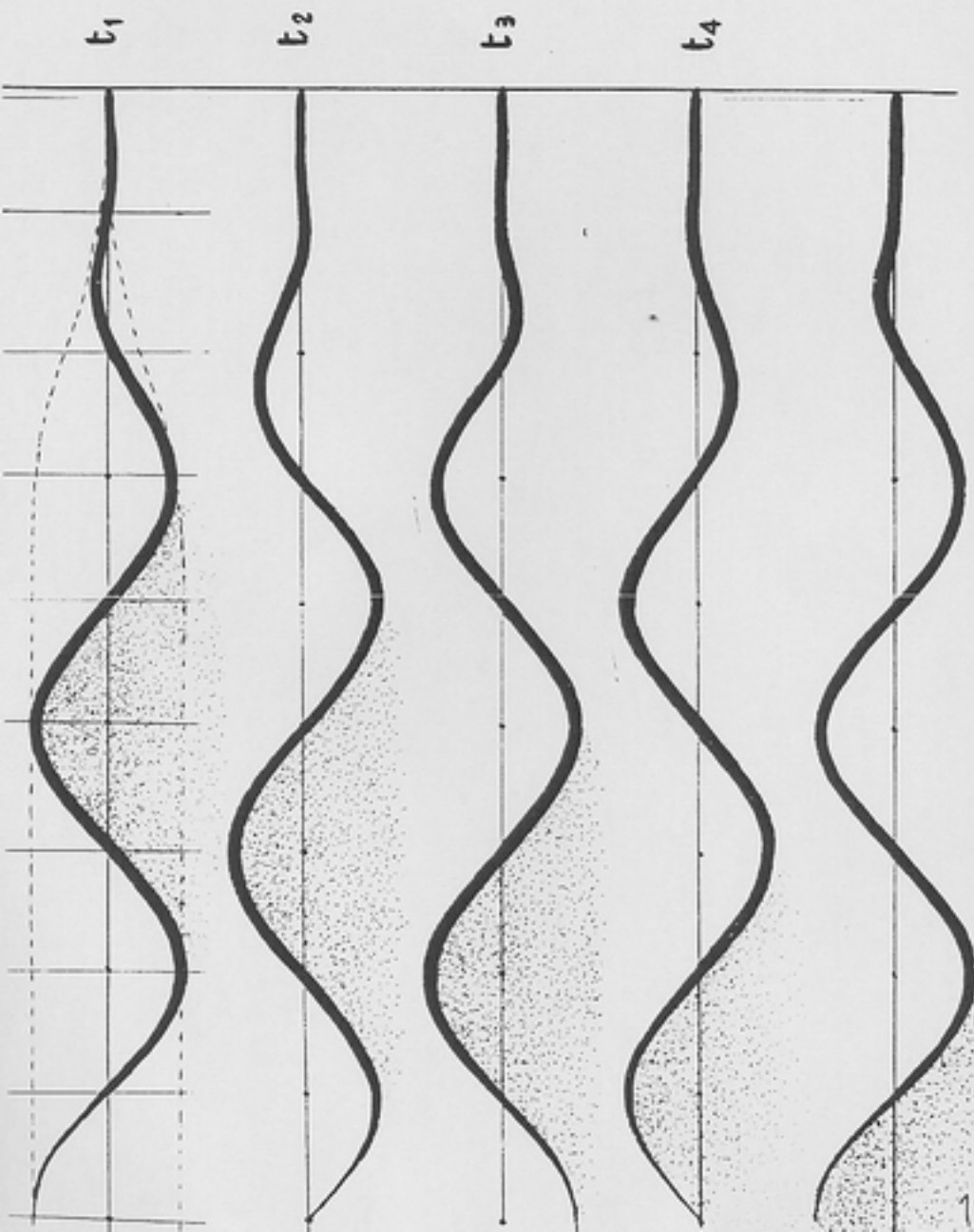
$t_2$

$t_3$

$t_4$



... masse d'acqua, accolte nelle varie anse dell'onda, vengono convogliate all'indietro dallo spostamento del profilo: per reazione, il pesce riceve una spinta in avanti

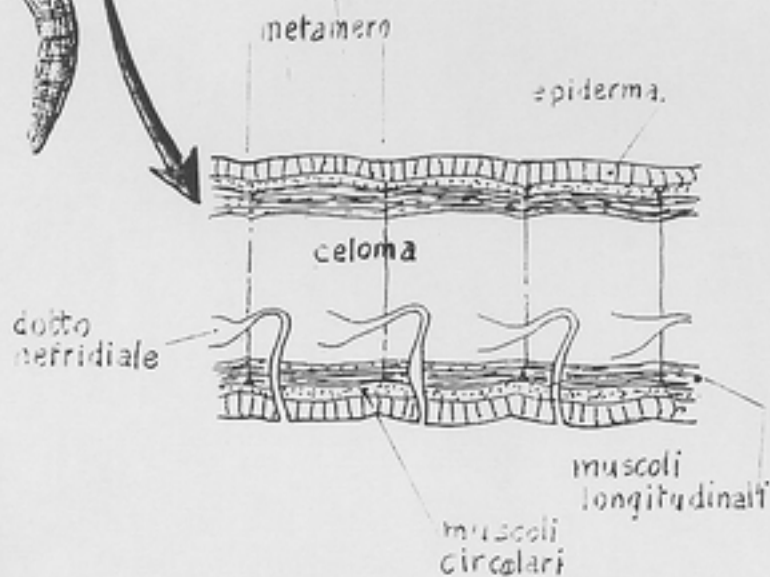


.. propulsione per spinta a  
onde contro il terreno

## LOMBRICO (ANNELIDI)



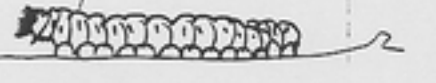
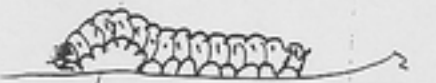
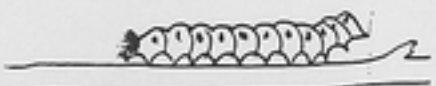
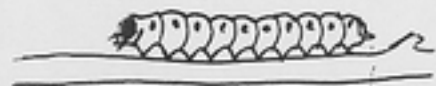
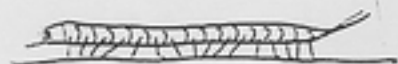
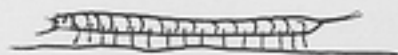
...onde di contrazioni  
dei muscoli longitudinali...



.. come muovere  
tutti questi piedi?

## BRUCO di INSETTO

### "MILLEPIEDI" (miriapodi)



**...movimenti "a onda"  
delle coste**

*(...non ho zampe...ma  
ho molte coste ... libere!)*

SERPENTI ARBORICOLI

