



Analogy is one of the most powerful tools a physicist has to arrive at an understanding of the mysteries of nature.

Oscillazioni



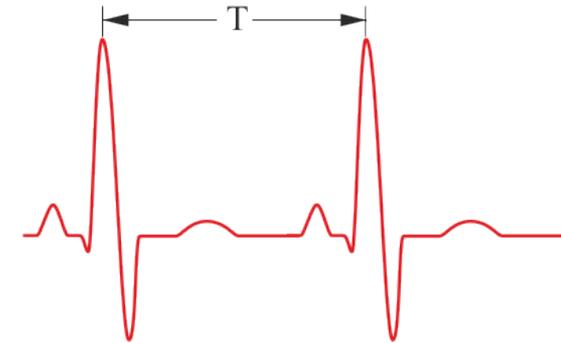
Corso di Fisica per CTF
AA 2016/17



- Oscillazioni
 - sistema massa-molla, pendolo semplice
 - oscillazioni smorzate; oscillazioni forzate, risonanza
- In generale \forall movimento di un sistema che si riproduce **esattamente** uguale dopo un tempo T (periodo)
- Sia x una grandezza fisica caratteristica del sistema che ne descrive lo stato (pressione di un gas, deformazione di un corpo, corrente elettrica etc.) [$x = 0$ corrisponde ad una situazione equilibrio], allora

$$x(t) = x(t + nT)$$

n – intero



e anche

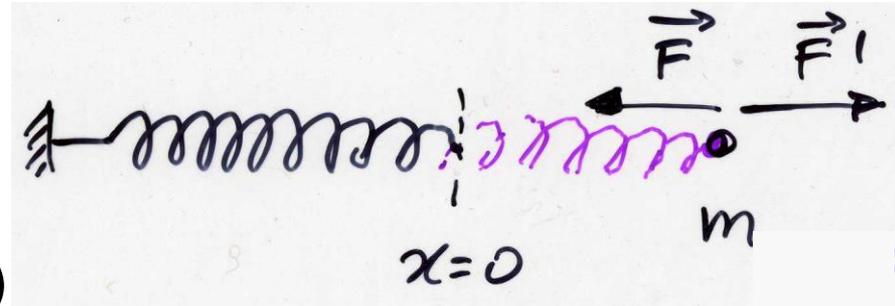
$$v(t) = v(t + nT)$$

$$a(t) = a(t + nT)$$



Sistema massa-molla

- una massa oscilla attaccata ad una molla (ad es. sopra un piano senza attriti)
- per spostare la massa (molla) di dx dalla posizione (allungamento) x , lavoro *sulla* molla:



$$d\mathcal{L} = Fdx = -kxdx$$

$$\mathcal{L} = \int_0^x -kxdx = -k \int_0^x xdx = -\frac{1}{2}kx^2 \quad (\text{dalla posiz. di equilibrio a } x)$$

$$\Delta W = -\mathcal{L} = \frac{1}{2}kx^2 = W(x) - W(0)$$

$$W(x) = \frac{1}{2}kx^2 \quad \text{se pongo } W(0) = 0$$

$$A, \text{ spostamento massimo: } W(A) = \frac{1}{2} kA^2$$

$$\text{en. cinetica della massa: } K = \frac{1}{2} mv^2$$

$$W(x) + K(x) = E_0$$

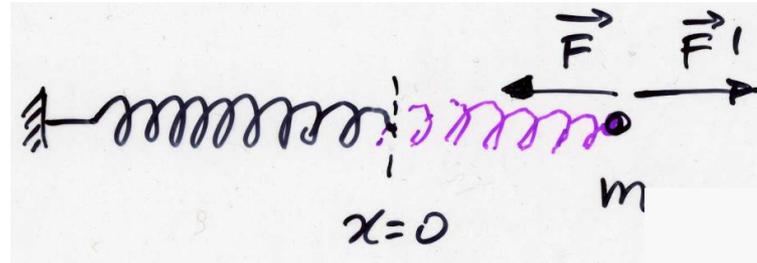
$$[W(t) + K(t) = E_0$$

conserv. en. totale meccanica

fln apr 17 siccome $x = x(t)$, $v = v(t)$!] ₃



Energia nei sistemi meccanici



en. della molla (potenziale)

$$W = \frac{1}{2}kx^2$$

ampiezza del moto A

en. totale: $E_0 = W(x) + K(x) = \frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kA^2 = \frac{1}{2}mv_{\max}^2$

pongo

$$\omega^2 = k/m = (v_{\max}/A)^2$$

eq. di moto

$$a = -(k/m)x = -\omega^2x \quad (\text{Il princ.: } ma = F = -kx)$$

soluzione con $x=+A$ per $t=0$, **matematicamente:**

$$x(t) = A\cos\omega t$$

moto armonico semplice

$$v(t) = -\omega A\sin\omega t \quad (=dx/dt)$$

$$a(t) = -\omega^2 A\cos\omega t \quad (=dv/dt)$$

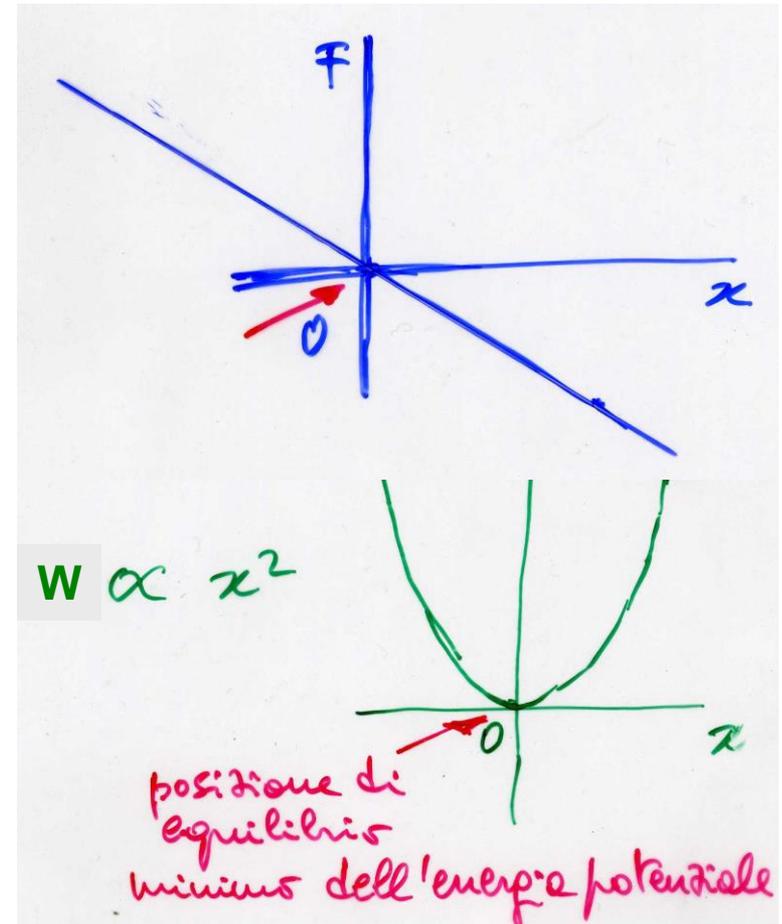
[per una dimostrazione vedi oltre]



Oscillazioni armoniche

- in generale: un sistema oscilla intorno ad una posizione di equilibrio stabile – con moto armonico semplice se la **F di richiamo** verso la posizione di eq. stabile è \propto **-spostamento** e c'è un'inerzia che fa superare la posiz. di equil. continuando il moto (piccole oscillazioni del pendolo, massa-molla, circuito LC, molecola H₂)

- $F(x) \propto -x$ \leftarrow k \rightarrow $(a \propto -x)$
- $W(x) = -\mathcal{L}(x) \propto x^2/2$ \leftarrow m





Oscillazione (passo passo)

- trasferimento: en. cinetica \longleftrightarrow en. potenziale

t	x	v	a	en.	E_0
0	+A	0	$-\omega^2 A$	pot.	$\frac{1}{2}kA^2$
t_1	0	$-\omega A$	0	cin.	$\frac{1}{2}mv_{\max}^2$
t_2	-A	0	$+\omega^2 A$	pot.	$\frac{1}{2}kA^2$
t_3	0	$+\omega A$	0	cin.	$\frac{1}{2}mv_{\max}^2$
t_4	+A	0	$-\omega^2 A$	pot.	$\frac{1}{2}kA^2$

sposto il sistema dall'equilibrio e lo lascio andare

il moto si ripete uguale

- $t_4 = T$; $t_2 = t_4/2 = T/2$ per simmetria
 $t_1 = t_2/2 = T/4$; $t_3 = t_2 + (t_4 - t_2)/2 = 3T/4$ per simmetria
- $\omega = \sqrt{k/m} = v_{\max}/A \rightarrow v_{\max} = \omega A$



Soluzione (senza derivate)

- uso la cons. dell'en. meccanica (e $m=k/\omega^2$, e $v_{\max} = \omega A$)

$$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \cancel{\frac{1}{2}kA^2}(x/A)^2 + \cancel{\frac{1}{2}kA^2}(v/(\omega A))^2 = \cancel{\frac{1}{2}kA^2}$$

$$\rightarrow (x(t)/A)^2 + (v(t)/(\omega A))^2 = 1 \quad \text{cfr } \cos^2\Phi + \sin^2\Phi = 1 \quad \forall \Phi$$

- se voglio x e v periodiche con periodo T prendo

$$x(t)/A = \cos(2\pi t/T) \quad v(t)/(\omega A) = -\sin(2\pi t/T)$$

che soddisfano $x=A$ per $t=0$ e $v(T/4) = -v_{\max} = -\omega A$

- T è un tempo caratteristico del sistema

$$T = 1/\nu = 2\pi/\omega = 2\pi\sqrt{m/k}$$

l'unico **dimensionalmente** possibile

$$[\omega^{-1}] = [(m/k)^{0.5}] = [(M/(MT^{-2}))^{0.5}] = [T]$$



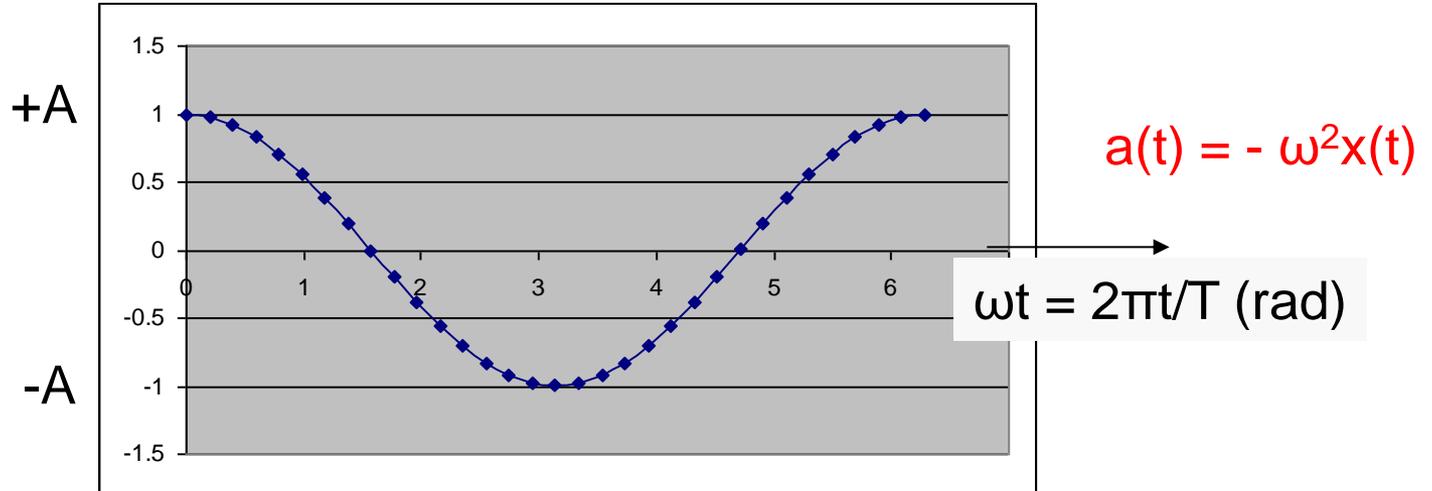
Oscillazioni (cont.)

- **tutte** le oscillazioni si comporteranno allo stesso modo, cambia solo ω (T) a seconda del sistema e cambia lo spostamento dalla posiz. di equilibrio (distanza, angolo, carica)
- **massa-molla** $\omega = \sqrt{k/m}$ $T = 2\pi\sqrt{m/k}$
- **pendolo semplice** $\omega = \sqrt{g/L}$ $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ piccole oscillaz.
- **[circuito LC** $\omega = 1/\sqrt{LC}$ $T = 2\pi\sqrt{LC}$ **v. cap. e.m.]**
- **etc.**
- spostamenti, **velocità (lineari, angolari, correnti), accelerazioni (lineari, angolari, derivata della corrente)** saranno tutti dati da funzioni sinusoidali (moto armonico semplice di pulsazione $\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$)

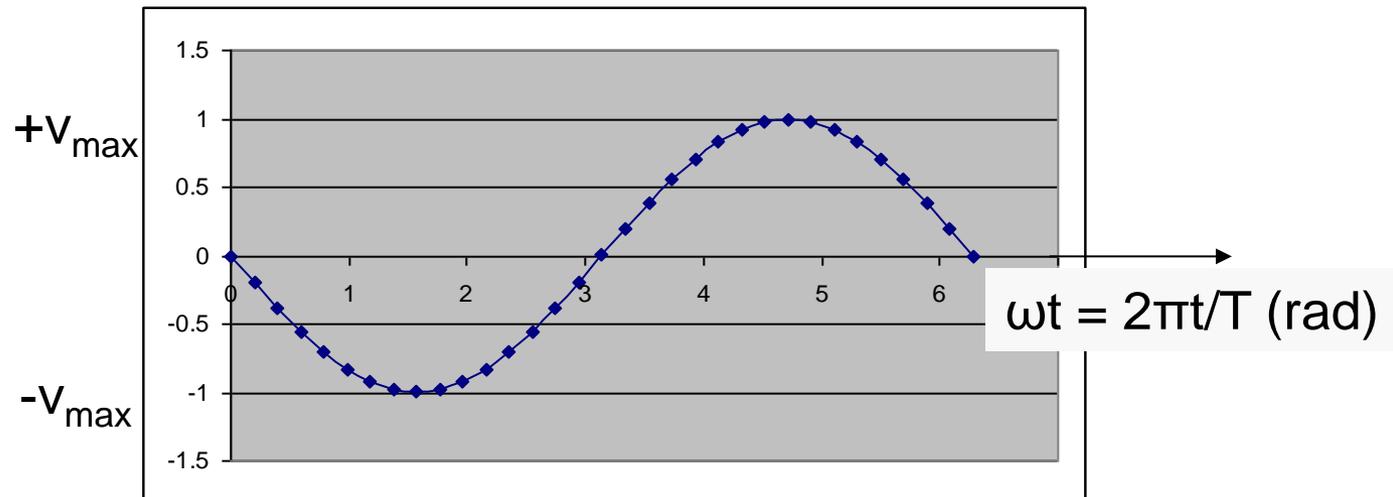


Oscillazioni (cont)

$x(t)$



$v(t)$





Pendolo semplice

- $mg \cos\theta = F$ *tensione del filo*

- ~~$-mg \sin\theta = ma = mL\alpha$~~

- piccole oscill.: θ_0 **piccolo**

$\rightarrow \sin\theta \sim \theta$ (rad!)

- $-g\theta = L\alpha$ ($= Ld^2\theta/dt^2$)

$$\omega^2 = g/L$$

$$T = 2\pi\sqrt{L/g}$$

indipendenti da θ_0

$$g = 4\pi^2 L/T^2$$

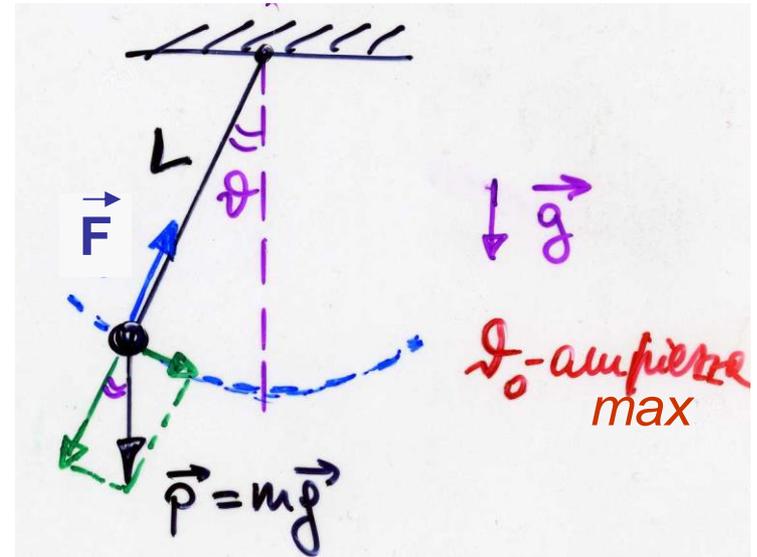
misurando $L, T \rightarrow g$

- (*) [pendolo fisico: $m \rightarrow I$; $\mathbf{P} \rightarrow \mathbf{M} = \mathbf{L} \times (m\mathbf{g})$

$$-mgL \sin\theta = I\alpha; \quad -mgL\theta = I\alpha; \quad T = 2\pi\sqrt{mgL/I}$$

con L distanza del baricentro dal centro di sospensione]

(*) paragrafo facoltativo





Angoli piccoli (*)

$$\theta = 90^\circ = 1.5708 \text{ rad}$$

$$\sin \theta = 1$$

$$(\sin \theta - \theta) / \sin \theta = -0.57$$

$$\theta = 30^\circ = 0.5236 \text{ rad}$$

$$\sin \theta = 0.5$$

$$(\sin \theta - \theta) / \sin \theta = -0.047$$

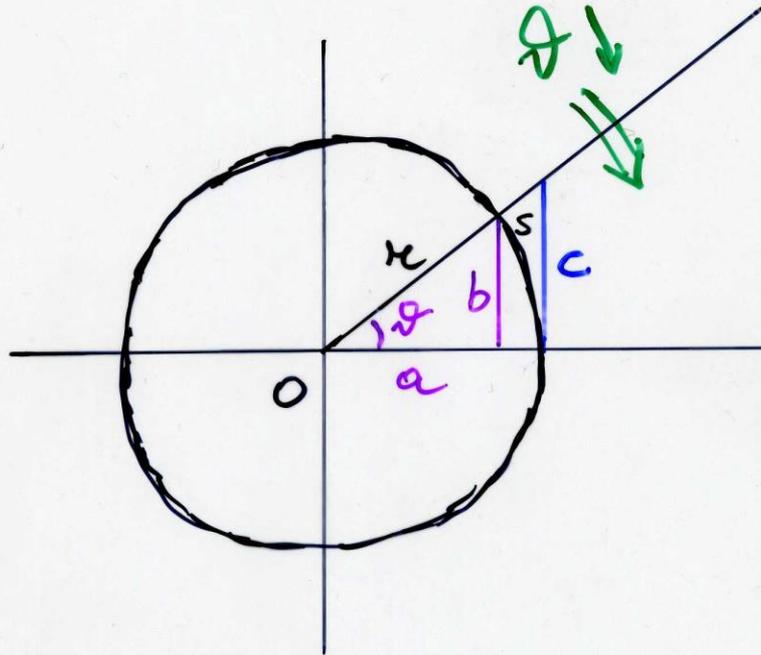
$$\theta = 3^\circ = 0.05236 \text{ rad}$$

$$\sin \theta = 0.05234$$

$$\text{tg} \theta = 0.05241$$

$$\begin{aligned} (\sin \theta - \theta) / \sin \theta &= \\ &= -0.00046 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (\text{tg} \theta - \theta) / \text{tg} \theta &= \\ &= +0.00091 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \sin \vartheta &= \frac{b}{r} \\ \cos \vartheta &= \frac{a}{r} \\ \text{tg} \vartheta &= \frac{b}{a} = \frac{c}{r} \\ \vartheta &= \frac{s}{r} \end{aligned}$$

$$\frac{b}{r} < \frac{s}{r} < \frac{c}{r} (= \frac{b}{a})$$

$$\sin \vartheta < \vartheta < \text{tg} \vartheta$$

(I Quadrante)

ϑ piccoli: $\sin \vartheta \sim \vartheta \sim \text{tg} \vartheta$

(*) facoltativo ma utile



Oscillazioni smorzate (*)

- sistema massa-molla **con attrito**

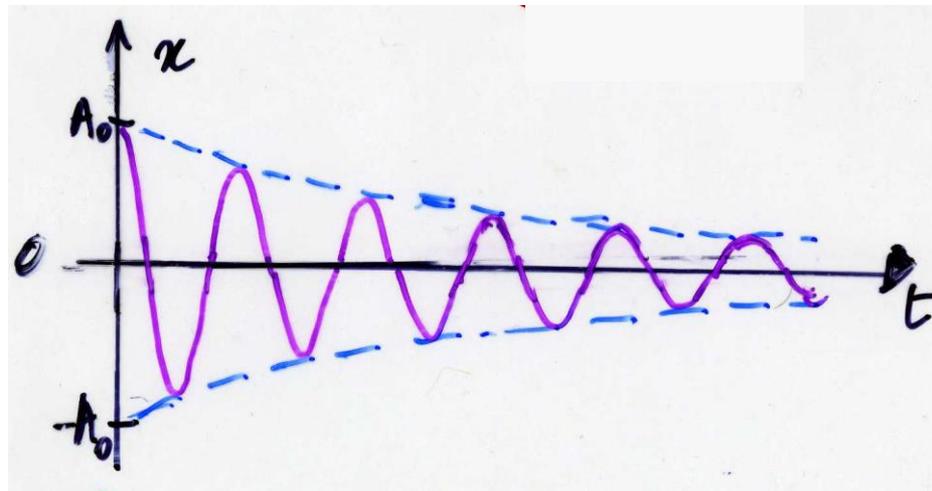
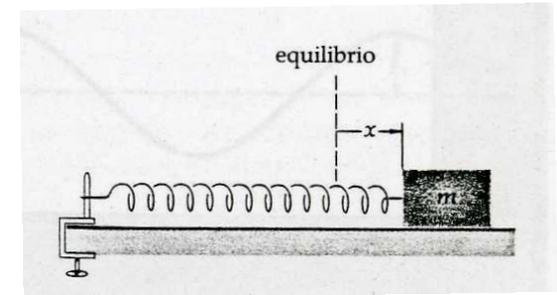
$$ma + \gamma v + kx = 0 \quad \text{termine } \propto v, \text{ attrito, smorzamento}$$

- $\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kA^2(t) < \frac{1}{2}kA_0^2$

ad es. $A(t) = A_0 \exp[-\gamma t / (2m)]$

- se $\gamma \geq 2\sqrt{km}$ il moto è aperiodico

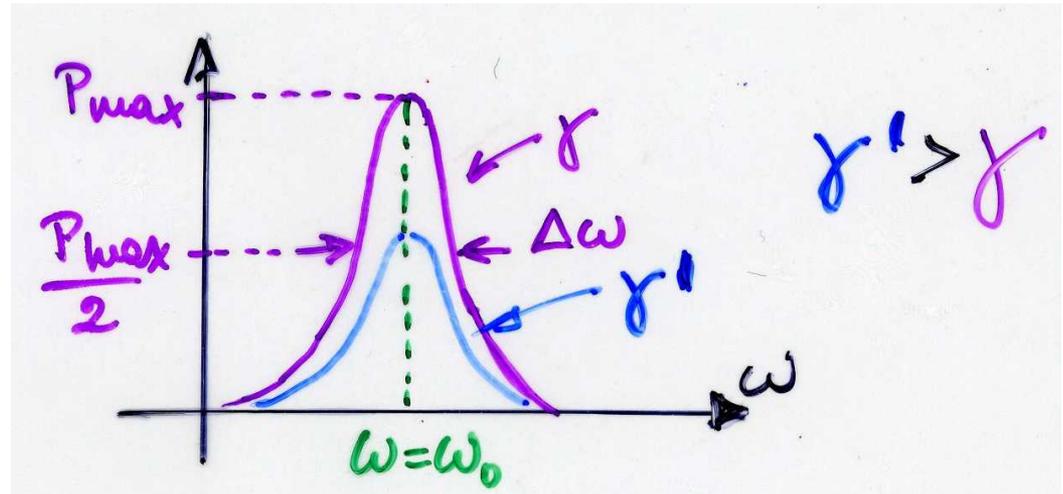
se $\gamma < 2\sqrt{km}$ oscillazione con A decrescente





Oscillazioni forzate, risonanza (*)

- sistema sottoposto ad una F esterna sinusoidale
ma + (γv) + $kx = F(t) = F_e \cos \omega t$
 $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ $\nu_0 = \omega_0/2\pi$ **frequenza propria del sistema**
- se $\gamma=0$ il trasferimento di energia diventa ∞ per $\omega=\omega_0$
(in pratica si avrà una 'rottura')
- se $\gamma \neq 0$ il trasferimento di energia (potenza) è max per $\omega=\omega_0$: es. assorb. di radiazione e.m. da parte di atomi e molecole





Oscillazioni, applicazione (*)

• molecola H_2 $\omega = \sqrt{k/\mu} = \sqrt{0.52 \cdot 10^3 / 0.84 \cdot 10^{-27}} \sim 0.8 \cdot 10^{15}$ rad/s

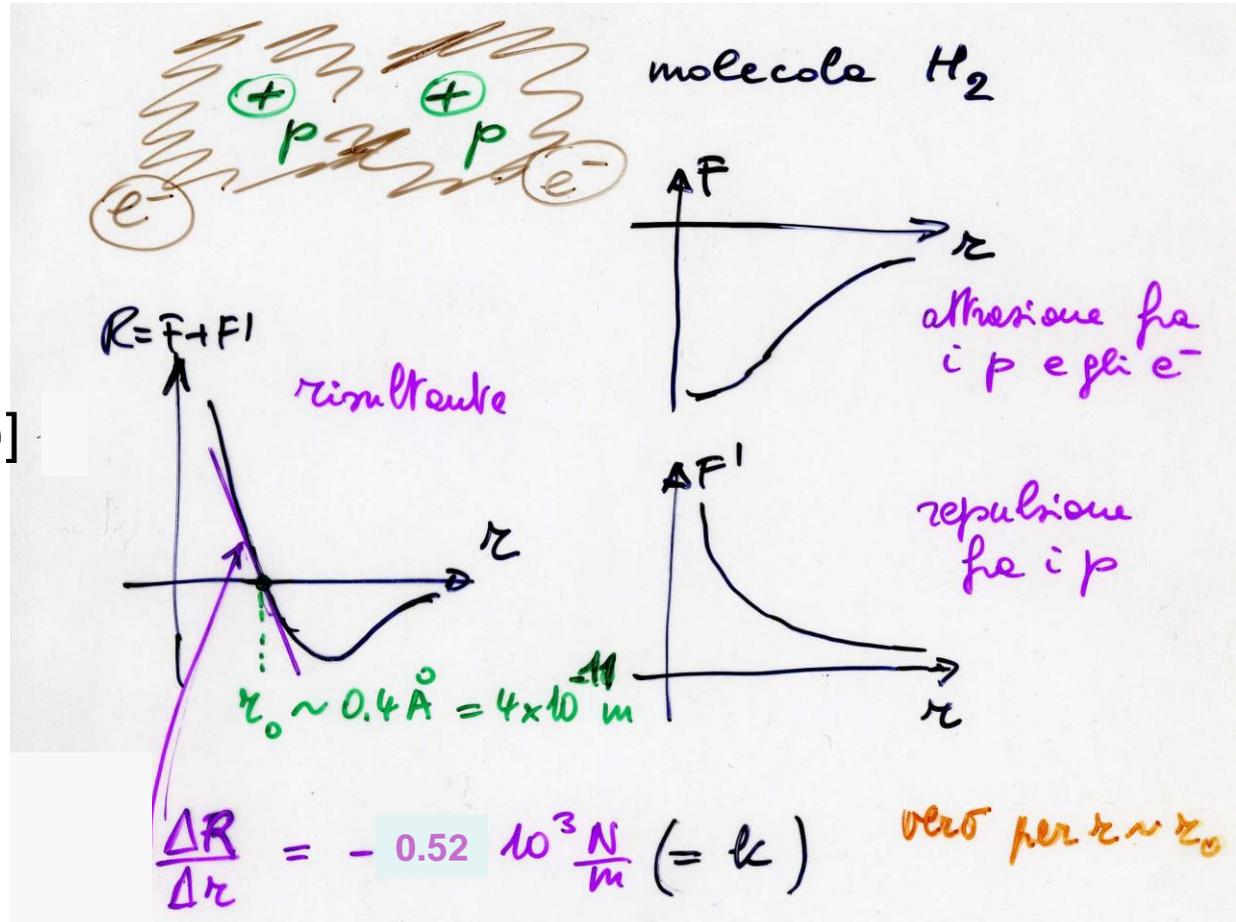
$$\nu = 1.3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda = c/\nu = 2.4 \text{ } \mu\text{m}$$

(vedi Onde) [μ è la massa ridotta del H_2
 $= m \cdot m / (m + m) = m/2$
(la vibrazione avviene rispetto al c.d.m. fisso)]

→ se si eccita H_2 con luce IR, H_2 si metterà ad oscill., assorbirà energia e posso «vederlo»

(*) facoltativo, nmal





**Two cowboys marvelling at the
Doppler effect in a train whistle**

Fine delle oscillazioni