

L'orologio medievale realizzato con materiali semplici

unità di apprendimento in fisica per la scuola secondaria

di Beniamino Danese

INTRODUZIONE

Questo articolo è dedicato all'orologio medievale "a verga e foliot" e al suo uso nella didattica della fisica per la scuola secondaria. Dapprima si precisano gli elementi di un'unità di apprendimento incentrata su di esso, poi si illustra la sua costruzione con materiali semplici, il suo funzionamento e il genere di esercizi per i quali esso serve egregiamente.

ELEMENTI DELL'UNITÀ DI APPRENDIMENTO

APPRENDIMENTO UNITARIO

Il nocciolo dell'unità di apprendimento è familiarizzare con l'orologio medievale, e coltivare le diverse competenze che esso stimola: nello sviluppo dell'abilità manuale che è così necessaria per le attività sperimentali, nell'analisi del funzionamento in base ai principi della meccanica classica, nella scoperta del valore dell'orologio come espressione della creatività dei medievali in scienza e tecnologia.

OBIETTIVI FORMATIVI

Fisica: oltre alle conoscenze e abilità legate alla costruzione dell'orologio, entrano in gioco – per la sua descrizione e comprensione – *tutti gli argomenti dello studio del moto*. Moto uniforme e accelerato, leve, momento angolare, forze, urti, energia potenziale e cinetica. La calibrazione dell'orologio coinvolge inoltre le conoscenze e abilità legate al trattamento dei dati sperimentali.

Oltre a queste conoscenze "curricolari" l'attività si pone esplicitamente come obiettivo l'esercizio dell'abilità nel maneggiare assennatamente equazioni con lettere che stanno per grandezze fisiche, spostando pezzi delle equazioni di qua e di là per riscriverle nella forma desiderata, sostituendo numeri alle lettere per stimare le grandezze in gioco.

L'unità di apprendimento proposta, nonostante riguardi la fisica, ha connessioni con altre discipline che possono essere sviluppate.

Storia: l'orologio medievale è una pietra miliare della storia della scienza e insieme un prodotto legato in vario modo alla società medievale. Questo strumento fornisce un esempio di come sia possibile inquadrare gli studi scientifici in una dimensione storica, e comprendere il valore dei documenti storici (anche iconografici o letterari).

Letteratura Italiana: Le descrizioni dantesche dell'orologio medievale sono una illustrazione spettacolosa sia della diffusione dell'orologio a verga e foliot nel trecento, sia

della competenza scientifica del sommo poeta. La grande metafora del cosmo come un orologio ha poi una grande rilevanza, testimoniata dalla letteratura, anche per temi come il tempo e la creazione, i meccanismi e la libertà, l'ordine e il buon governo.

MEDIAZIONE DIDATTICA

La scelta didattica è incentrata sulla costruzione da parte degli studenti di orologi funzionanti fatti con materiali semplici, quali cannucce, stecchini e cartone.

In un primo momento un esemplare di orologio costruito dal docente viene mostrato alla classe, insieme ad un racconto sulla tecnologia medievale. L'orologio a verga e foliot, nell'interazione dinamica e controllata delle sue parti, è quasi impossibile da descrivere a parole, e pertanto è appropriato che esso si presenti da solo, con il suo movimento e il suo ticchettio.

La scelta didattica prevede di cominciare la costruzione personale dell'orologio in classe. Con ciò si vuole dire che l'abilità e l'attenzione nel costruire sono parte integrante dell'insegnamento della fisica. Generalmente la costruzione di tali delicati strumenti viene affrontata dagli studenti in modo molto coscienzioso. La costruzione viene poi terminata a casa, con calma.

La statica, la cinematica e la dinamica studiate alla scuola secondaria trovano illustrazione in questo strumento, che si presta molto bene anche come fonte di numerosi esercizi numerici.

Per quanto riguarda l'apporto della storia e della letteratura, essi possono essere mediati dal docente stesso per mezzo di un racconto, che preveda l'uso delle fonti. Ci sembra che un *excursus* del docente di fisica nei territori della storia della scienza, e perfino dell'arte e della letteratura, non possa che giovare all'insegnamento della fisica, facilitando forse anche la comunicazione di ciò che molti studenti (e docenti) pensano sia a essa ortogonale, le emozioni.

COMPITO IN SITUAZIONE

Come compito in situazione si propone la stesura di una descrizione dell'orologio medievale che è stato costruito, con disegni. La descrizione comprenderà misure sperimentali sulla relazione tra la lunghezza del bilanciere e la durata degli intervalli di tempo battuti dall'orologio. La descrizione farà uso di vari problemi standard di fisica per rendere conto di alcune proprietà quantitative dell'orologio.

Si tratta quindi di una composizione che unisce una parte prevalentemente descrittiva a una prevalentemente numerica e di equazioni. La parte descrittiva è importante per lo sforzo da parte dello studente di organizzare il testo ed esprimersi con parole sì proprie ma allo stesso tempo il più possibile precise, sintetiche e chiare.

Questo tipo di sforzo ha una grande rilevanza per la formazione dello spirito scientifico, per la quale non è sufficiente l'adeguarsi a un linguaggio di riferimento e a una scansione della descrizione sulla falsariga "metodi, obiettivi, risultati". Ci sembra dunque importante lasciare allo studente carta bianca nella stesura della relazione, proprio per favorire lo sforzo personale di organizzarla, come succede nei temi.

Infine, anche la bontà della costruzione dell'orologio può costituire elemento di valutazione o, piuttosto, di auto-valutazione da parte dello studente stesso.

L'OROLOGIO MEDIEVALE

“Avete mai veduto un orologio medievale in azione? Potrà sembrare incredibile a chi non lo ha veduto, ma dal ritmico e continuo vibrare di quella specie di spiritello della barra del bilanciante, dal guizzare della serpentina, mentre le altre parti sembrano immobili, consegue una sensazione di cosa viva da restare incantati. È uno spettacolo che non ci si stanca di stare a guardare: infinitamente più suggestivo che non l'oscillare di un pendolo o il veloce vibrare dei bilancieri moderni. Il mondo umanistico ne fu estasiato e percosso di meraviglia” [1].

La meraviglia suscitata da questo congegno, così ben descritto dallo storico dell'orologeria Antonio Simoni, è ulteriormente aumentata dal fatto di averlo costruito personalmente a partire da materiali semplici. L'uso dei materiali semplici insegna in modo impareggiabile che le leggi esatte della fisica non appartengono a un mondo astratto o ad arcani laboratori specializzati, ma si mostrano e si possono incontrare nel mondo di tutti i giorni. L'orologio è dunque un esempio potente dell'*imparare scienza facendo scienza con materiali semplici* [2].

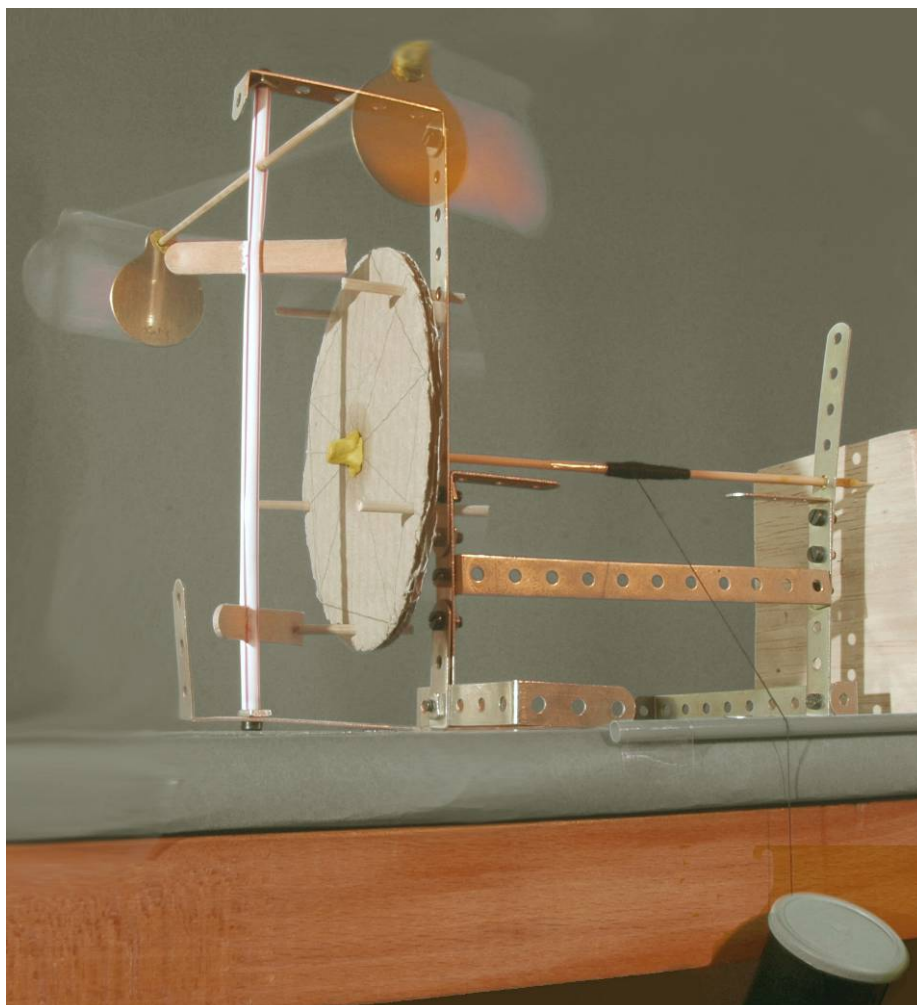


Fig. 1 – l'orologio medievale realizzato con materiali semplici

Possiamo individuare tre parti nel meccanismo di funzionamento dell'orologio meccanico:

- un peso che cade (nel nostro caso un rullino fotografico, o una penna) (di qui il nome *orologio a trascinamento di peso*)
- un sistema ruotante composto da *albero* (uno stecchino) + ruota detta *corona* (fatta di cartone) + *denti* della corona (fatti con stuzzicadenti, nel nostro caso 5).
- un sistema oscillante avanti e indietro composto da *verga* (una cannuccia) + due *palette* (stecchini di ghiacciolo) + *bilanciere* o *foliot* (stecchino) + due pesi mobili sul foliot (nel nostro caso due pezzi di portachiavi) (di qui il nome *orologio a verga e foliot*).

La caduta del peso attaccato a un filo per cucire fa ruotare l'albero e la corona. Un dente della corona – poniamo quello in alto – spinge la palette superiore, facendo ruotare la verga e foliot, fino ad un certo angolo in cui – essendosi spostata la palette – il dente può avanzare liberamente. Questo processo è detto *scappamento*. Nel frattempo, la rotazione di verga e foliot ha portato la palette inferiore a scontrarsi con uno dei denti della corona. I moti di corona e foliot, e la caduta del peso, sono dunque immediatamente stoppati. Poi la corona trascinata dal peso riprende la sua marcia, spingendo verga e foliot tramite la palette inferiore, stavolta nella direzione opposta alla precedente, fino a che si ha di nuovo lo scappamento. Il movimento di verga e foliot ha portato nuovamente la palette superiore tra i denti della corona, e il processo dunque si ripete, con la corona che svolge le sue rotazioni, regolata da verga e foliot che oscillano avanti e indietro, fin quando il peso non tocca terra.

Il modello proposto in fig. 1 esemplifica il meccanismo di funzionamento, ma si possono aggiungere ulteriori alberi e ruote dentate interconnessi tra loro, con lancette e quadranti ("*mostre*") per marcare lo scorrere del tempo. Il telaio proposto è costruito con i pezzi del Meccano, e la verga (cannuccia) è collocata in posizione grazie a due viti sporgenti. *Foliot* e palette sono semplicemente infilati in ritagli nella cannuccia, mentre albero e denti (soprattutto nel caso in cui le masse appese e il peso trascinante siano considerevoli) possono essere fissati alla corona tramite Pongo. Chiaramente, tante altre soluzioni sono possibili: per esempio, per fare il telaio ci siamo anche serviti della scatola di cartone di un'altra grande invenzione medievale, la pastasciutta.

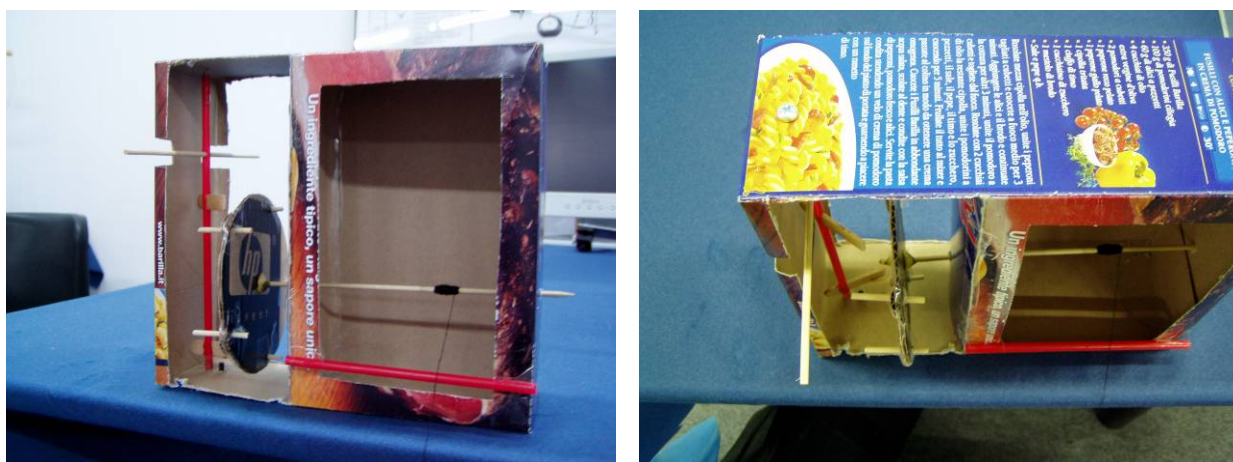


Fig. 2 – il telaio dell'orologio fatto con una scatola di pastasciutta anziché col meccano.

Materiali per un orologio:

- cannuccia (da usare come verga)
- 2 stecchini (foliot e albero)
- 1 stecchino da ghiacciolo per fare le due palette
- 2 anelli o medagliette di portachiavi (o altro) da usare come pesi mobili sul foliot
- 2 viti e dadi da usare come perni per la cannuccia
- cartone (la corona)
- stuzzicadenti (denti della corona) (altrimenti si può fare in cartoncino)
- filo
- pezzi di meccano (o scatola di cartone) per fare il telaio

Si possono aggiungere:

- altri stecchini (per ulteriori ruote e ingranaggi)
- rullini, stecchini, o altro per fare gli ingranaggi
- pongo per fissare i denti e l'albero alla corona, e i pesetti al foliot

METODOLOGIA: LA COSTRUZIONE

Nella costruzione sono incorporati principi fisici e problemi da risolvere. Per esempio, leve ed equilibrio, e il fatto che il sistema corona-albero può essere sbilanciato dalla parte della corona (Fig. 3a). O azione-reazione: mentre i denti spingono le palette le palette a loro volta spingono i denti e tutto il sistema corona-albero (Fig. 3b). Durante la costruzione e la messa a punto ogni studente incontra questi problemi ed elabora la loro soluzione.

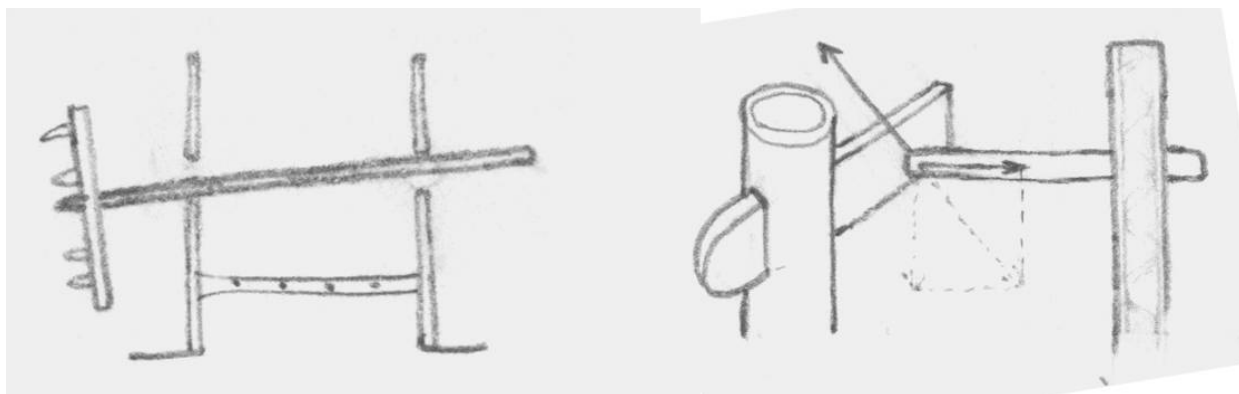


Fig. 3 – (a) possibile sbilanciamento del sistema corona-albero per via della massa della corona. (b) azione-reazione tra la palette della verga-foliot e il dente della corona.

Ci sono inoltre numerosi aspetti matematico-geometrici: la costruzione della corona dentata e il numero di denti (che deve essere dispari); l'angolo tra le palette (che è anche l'angolo di scappamento); la relazione tra quest'ultimo, il numero dei denti e la sovrapposizione tra palette e denti. Queste relazioni matematiche, inizialmente individuate a tavolino e nella riflessione, si ripresentano durante la costruzione e nel funzionamento, e vengono verificate, controllate, aggiustate.

Una fase molto istruttiva è la calibrazione, che mette in contatto con temi come la precisione, la ripetibilità, la stabilità. Per questo, i tempi vengono misurati: ogni studente ha un cronometro, o nel telefonino o nell'orologio. La calibrazione è una fase quantitativa poiché si va ad agire, soprattutto, sulla massa di ciò che cade trascinando il sistema, sulle masse appese al bilanciere e sulla loro posizione. Le masse vengono quindi pesate, scelte, variate. L'attività è immediatamente finalizzata al buon funzionamento dell'orologio. Si procede per tentativi ed errori, ma si cerca anche qualche formula, si cerca di comprendere e interpretare le relazioni in gioco sulla scorta della meccanica classica. Questa attività si configura dunque come un "problema alla Kapitza" [3].

METODOLOGIA: I PROBLEMI ALLA KAPITZA

Negli anni 60 e 70 Pyotr Kapitza usava proporre uno specifico tipo di problema a livello di scuola secondaria, "per incoraggiare il pensiero indipendente".

"È molto importante avere laboratori e seminari e risolvere problemi che incoraggino il pensiero indipendente. Non sempre gli esercizi per gli studenti sono adatti a ciò. Per la maggior parte questi problemi forniscono allo studente dei dati da mettere nella formula giusta per produrre la risposta corretta. Il lavoro è trovare la formula corretta. Questo non è pensiero indipendente. Specifico alcuni problemi a livello di scuola secondaria che spesso propongo agli studenti. (1) Stimare la potenza del motore di una pompa per fare un getto d'acqua sufficiente per spegnere un incendio al sesto piano. Con questo problema lo studente deve giudicare da sé l'altezza del palazzo, e dove mettere la pompa. Ogni studente può decidere in modo diverso su questi problemi, ed è facile vedere quale è meglio. (2) Stimare le dimensioni di una lente convessa che focalizzi la luce del sole in un punto dove si vuol far prendere fuoco. Lo studente deve trovare quanto calore è necessario, e quanto il fuoco della lente determina le sue dimensioni, e ancora una volta dovrà pensare a tutto il problema".

Si noti come gli esercizi proposti da Kapitza non differiscono nel contenuto da quelli che si propongono usualmente. Ma la prospettiva, legata al problema concreto e ampio, e alla sua soluzione, favorisce una presa molto più diretta sulle equazioni stesse, sul loro legame col mondo reale, sugli ordini di grandezza in gioco.

La descrizione quantitativa dell'orologio medievale può essere considerata un "problema alla Kapitza". Infatti, se ci accingiamo a descrivere l'orologio medievale, scomponendolo e analizzando le sue parti una alla volta, ci imbattiamo in problemi standard che però acquisiscono una prospettiva nuova per via dell'attività cui sono finalizzati.

Ne analizziamo quattro:

- §1. il peso trainante,
- §2. il momento angolare,
- §3. il sistema di ingranaggi,
- §4. l'urto anelastico.

§1. il peso trainante

Uno dei primi problemi è il peso in caduta attaccato ad un filo che trascina tutto il sistema. Il caso più semplice è il trascinamento di una massa, senza attrito.

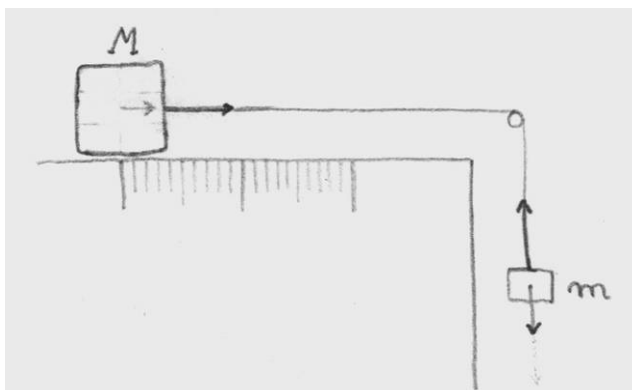


Fig. 4 – problema del peso trainante

In questo problema abbiamo due oggetti, la massa m che cade e la massa M trascinata. Per ogni oggetto il moto (dp/dt o ma che dir si voglia) è determinato dalle forze agenti su di esso (F) secondo la legge di Newton, e pertanto per ognuno dei due oggetti scriviamo un'equazione del moto nella forma $ma=F$.

$$\text{per } m \text{ si ha } \quad ma = mg - T \quad (1)$$

$$\text{per } M \text{ si ha } \quad Ma = T \quad (2)$$

Il filo è teso e dunque la tensione ai due capi è la medesima: pertanto nelle due diverse equazioni compare la medesima T . Anche l'accelerazione a è la medesima nelle due equazioni, in quanto i due corpi formano un sistema che si muove rigidamente come un tutt'uno. Il fatto che i due corpi connessi dal filo formino un sistema, si esprime matematicamente combinando le due equazioni in un sistema

$$\begin{cases} ma = mg - T \\ Ma = T \end{cases} \quad (3)$$

dove a e T sono le incognite. La soluzione del sistema ci dà

$$a = \frac{m}{m+M} g \quad (4)$$

La massa M , trascinata con questa accelerazione, partendo da ferma, impiega il seguente tempo a coprire la distanza s :

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2s}{g} \frac{m+M}{m}} \quad (5)$$

Per esempio, nell'approssimazione $m \ll M$, si ha che t raddoppia quadruplicando M , o dividendo m per 4. Lo studio quantitativo dell'orologio può essere affrontato come una serie di variazioni su questo esercizio. È quanto viene fatto nei prossimi due paragrafi, prendendo in considerazione prima il momento angolare e poi un sistema di ingranaggi.

§2. il momento angolare

La prima variazione consiste nel sostituire alla massa da trascinare M un sistema come il nostro foliot, con una verga di raggio r e un foliot (senza massa) di lunghezza l al quale sono attaccate due masse M .

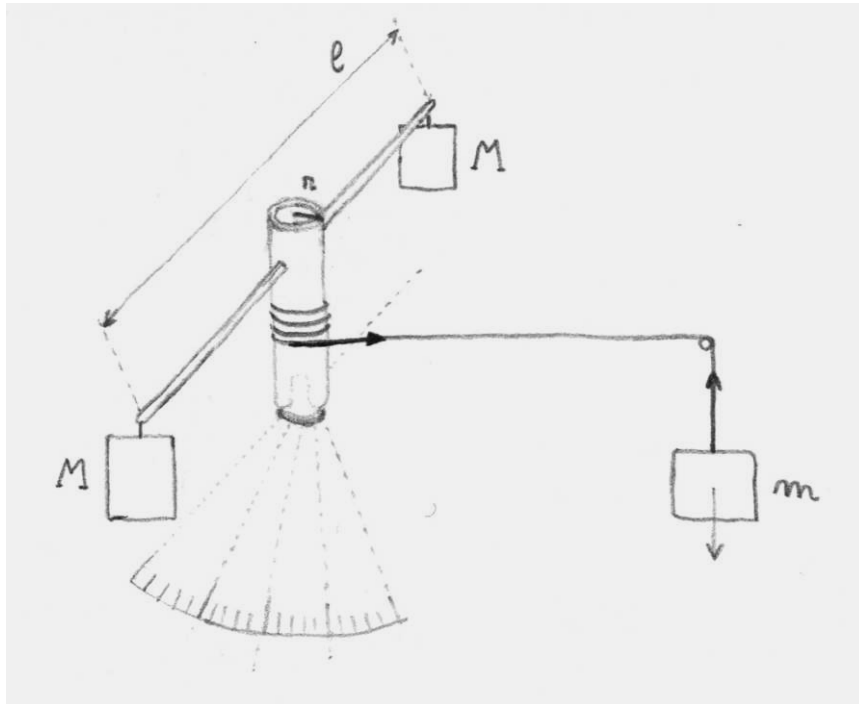


Fig. 5 – problema del peso trainante, non una semplice massa M , ma due masse M attaccate a un foliot rotante di lunghezza l su una verga di raggio r .

L'equazione per la massa m è analoga all'eq.(1), mentre per il foliot rotante anziché la variazione di momento (dp/dt) determinata dalla forza F si considera la variazione di momento angolare (dL/dt) determinata dal momento torcente (Fr):

$$\frac{Ml^2}{2} \alpha = T \cdot r \quad (6)$$

Le due equazioni (1) e (6) sono legate: T è la medesima in entrambe, mentre l'accelerazione a e l'accelerazione angolare del foliot α sono collegate da

$$\alpha \cdot r = a \quad (7)$$

Si ha dunque il sistema

$$\begin{cases} ma = mg - T \\ \frac{Ml^2}{2} a = T \cdot r^2 \end{cases} \quad (8)$$

Da cui

$$a = \frac{m}{m + \frac{M}{2} \frac{l^2}{r^2}} g \quad (9)$$

Il rapporto tra la lunghezza del foliot e il raggio della verga o dell'albero è tale da giustificare l'approssimazione di (9) in modo da ottenere

$$a = 2 \frac{m}{M} \frac{r^2}{l^2} g \quad \text{e dunque} \quad \alpha = 2 \frac{m}{M} \frac{r}{l^2} g \quad (10)$$

Data l'accelerazione angolare, possiamo stimare il tempo impiegato dal foliot a spazzare un angolo dato, θ , che poi corrisponderà all'angolo di scappamento. Si ha

$$t = \sqrt{\frac{2\theta}{\alpha}} = \sqrt{\frac{2\theta}{g} \frac{M}{2m} \frac{l^2}{r}} = \sqrt{\frac{\theta}{g} \frac{M}{mr}} \cdot l \quad (11)$$

una relazione che esprime la linearità tra la distanza che separa le due masse appese e l'intervallo di tempo corrispondente: dimezzando la distanza si dimezza il tempo, raddoppiando la distanza si raddoppia il tempo, aumentando la distanza di un 10% si aumenta il tempo di un 10%.

Tale linearità tra t ed l caratterizza anche l'orologio costruito con materiali semplici, come si può verificare con rapide misure sperimentali. Un esempio è costituito dai dati in tabella e dal grafico in Fig. 6. La relazione è lineare, $t = 1,1 l$.

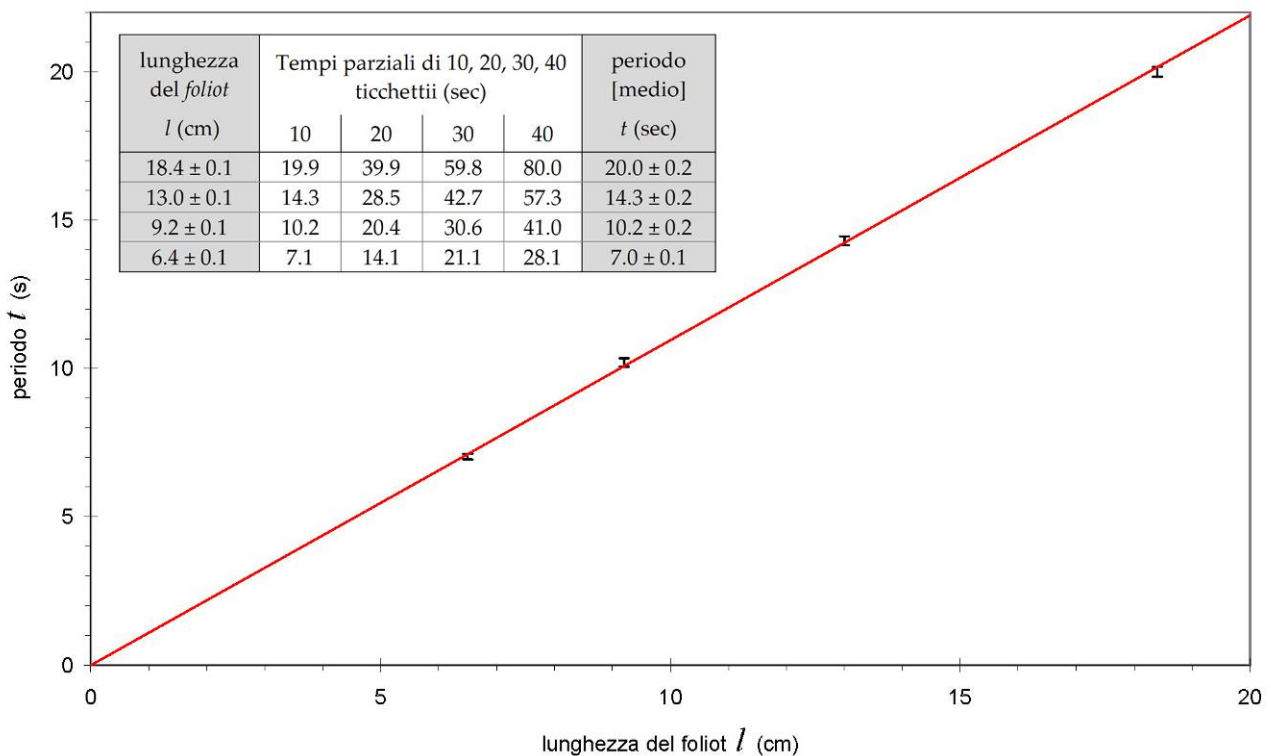


Fig. 5 – grafico della relazione tra l (posizione delle masse sul foliot) e conseguente periodo t .

§3. il sistema di ingranaggi e il raggio efficace

Un'altra variazione sul tema che ci avvicina ulteriormente al nostro orologio si ottiene combinando una serie di ruote e ingranaggi privi di massa.

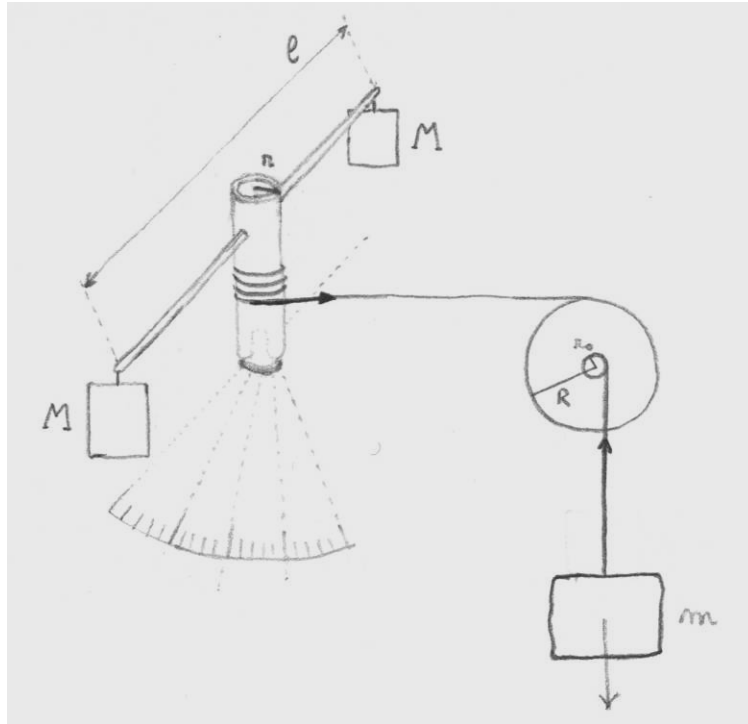


Fig. 6 – problema del peso trainante, tramite un sistema di ingranaggi di raggi r_0 e R , due masse M attaccate a un foliot rotante di lunghezza l su una verga di raggio r . È una buona approssimazione del nostro orologio.

Gli ingranaggi possono essere considerati come leve i cui bracci sono i raggi, e pertanto la forza T_F che tira il foliot si ottiene demoltiplicando dalla tensione del filo dove è appesa la massa m :

$$T \cdot r_0 = T_F \cdot R \quad \text{ossia} \quad T_F = T \cdot \frac{r_0}{R} \quad (12)$$

Con questa avvertenza, il sistema si ottiene sostituendo (12) nella seconda equazione in (8):

$$\begin{cases} ma = mg - T \\ \frac{Ml^2}{2} a = T \cdot \frac{r_0}{R} \cdot r^2 \end{cases} \quad (13)$$

Da cui infine si ottiene

$$t = \sqrt{\frac{\theta}{g} \frac{M}{m} \frac{R}{r_0 \cdot r}} \cdot l \quad (14)$$

Con $\theta = \theta_E$ la formula esprime con buona approssimazione l'intervallo di tempo t_E necessario al compiersi di uno scappamento nell'orologio costruito a partire da materiali poveri qui presentato. La stessa formula dà anche la legge oraria $\theta = \theta(t)$ del foliot mentre viene spinto dalla corona, tra un urto e l'altro.

§4. l'urto anelastico

Le alterne collisioni tra le palette della verga e foliot e i denti della corona sono il modo per mezzo del quale l'orologio è regolarmente rallentato e il suo moto diventa periodico.

Per studiare le collisioni possiamo, come nel caso del trascinamento del peso, individuare dapprima un problema semplice. Ricorriamo dunque ad una collisione tra la massa M_1 (trascinata da m come nell'esercizio §1) che procede accelerando (rappresenta i denti della corona) e a velocità v si scontra con una massa M_2 che procede a velocità $-w$ (la palette del verga-foliot).

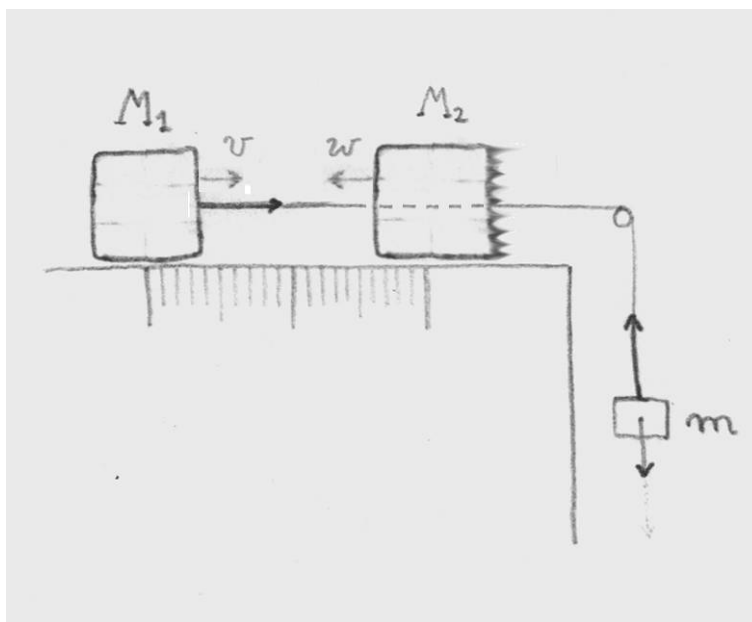


Fig. 7 – problema del peso trainante con urto sul peso trainato

Per ciascuno dei due oggetti possiamo scrivere la quantità di moto nella forma $p=mv$:

$$\text{per } M_1+m \text{ si ha } p_1 = (M_1 + m)v \quad (15)$$

$$\text{per } M_2 \text{ si ha } p_2 = -M_2w \quad (16)$$

Trattandosi di un urto (conservazione della quantità di moto) che possiamo considerare anelastico (dopo l'urto i due oggetti procedono attaccati), la quantità di moto P' del sistema dopo l'urto è pari alla quantità di moto totale del sistema prima dell'urto. Cioè

$$P' = (M_1 + m)v - M_2w \quad (17)$$

$$V' = \frac{(M_1 + m)v - M_2w}{M_1 + m + M_2} \quad (18)$$

A seconda delle masse in gioco, quindi, si hanno tre casi differenti: le masse trascinate vengono rallentate dall'urto ma continuano a procedere nello stesso verso; il sistema si ferma per un istante dopodiché m riprende il trascinamento; M_2 spinge all'indietro il sistema fino a quando il trascinamento ha la meglio.

Naturalmente, le formule (15-18) possono venire modificate per tenere conto dei momenti angolari e degli ingranaggi.

In ogni caso, anche il problema semplice mostra, attraverso l'eq. 18, il ruolo delle collisioni nello stabilizzare il ciclo dell'orologio. Se infatti la corona (rappresentata da M_1+m) trasferisse più impulso alle palette (M_2) rispetto a una quantità di "equilibrio", anche il successivo impatto frenante delle palette sarebbe più forte, rallentandola maggiormente. Se la corona invece trasferisse una minore quantità di impulso, l'impatto frenante successivo sarebbe più debole consentendole di acquisire maggiore impulso.

Per questo il foliot viene detto *regolatore*. Più volte, in quest'era di elettronica e *feedback*, l'orologio a verga e foliot è stato definito "*double feedback*" (a doppia retroazione). Infatti, come è particolarmente evidente nell'ipotesi di urto anelastico, l'energia cinetica "persa", o impiegata nella collisione per frenare il moto della corona, era stata impartita al foliot dalla corona stessa. Nell'ambito di questo esercizio, l'energia cinetica persa è data da

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \frac{(M_1 + m)M_2}{(M_1 + m) + M_2} (v + w)^2 \quad (19)$$

Nel caso in cui M_2 spinga all'indietro il sistema si può anche calcolare di quanto viene fatta risalire m e la corrispondente energia potenziale. Anche questi calcoli possono avere una diretta verifica sperimentale.

La doppia retroazione, e il fatto di renderla visibile in modo semplice, rende l'orologio meccanico uno strumento didattico utile anche al di là della meccanica classica.

Lo scappamento può infatti essere considerato il primo di una serie di regolatori a retroazione che ebbero un grande impatto sulla tecnologia, come il regolatore di Watt, gli alettoni, il giroscopio e l'amplificatore elettronico [4]. L'orologio a verga e foliot è un oscillatore, al pari di un oscillatore elettronico o del cuore umano.

L'IMPORTANZA DIDATTICA DELL'OROLOGIO MEDIEVALE

In questo articolo si è proceduto cercando di collegare le abilità nella costruzione e nell'osservazione ai metodi e principi fisici che permettono lo studio quantitativo dell'orologio e la coordinazione matematica delle varie osservazioni. Troppo spesso infatti la didattica della fisica insiste sui secondi ma dimentica le prime.

Così facendo, tuttavia, non riesce a veicolare lo stretto legame che unisce il mondo reale delle cose e il mondo delle formule e delle equazioni.

Chiaramente, la grande metafora del cosmo come un orologio, usata già da Cicerone, viene portata su un altro livello dalla descrizione secondo la fisica, che coordina in modo quantitativo i moti e i ritmi degli orologi meccanici come degli astri.

La descrizione della meccanica classica fornisce infatti una comprensione dell'orologio meccanico che non si può ricavare in altri modi: una comprensione quantitativa del suo funzionamento effettivo a partire da principi fisici generali.

L'unicità e l'insostituibilità di questo tipo di comprensione è il motivo per cui la fisica è una parte importantissima e preziosa della cultura.

Un esempio è dell'importanza di questo tipo di comprensione è dato dalla precisione. Dal punto di vista della precisione, bisogna ricordare che gli orologi ad acqua erano molto superiori agli orologi meccanici pendolari. Per l'osservazione astronomica la cronometria a fluido, con acqua pura e temperatura dell'ambiente controllata, garantiva scarti di pochi secondi nelle ventiquattro ore. Gli orologi meccanici più accurati non andavano al di sotto di qualche minuto. Questi ultimi, pertanto, non venivano usati per quegli studi che richiedevano grande precisione, come in astronomia.

Qual era allora l'uso degli orologi meccanici? E, quando videro la luce i primi orologi meccanici? Una referencia insostituibile per questa e altre questioni è il già citato *"Orologi Italiani"* di Antonio Simoni, sicuramente un ottimo punto di partenza per approfondimenti di carattere tecnico, storico e letterario. Da questo ricco testo sono principalmente tratte le annotazioni che seguono, e che si ritiene opportuno fornire per completare il quadro sull'uso didattico dell'orologio medievale [5].

L'OROLOGIO NELLA STORIA E NELLA LETTERATURA

Innanzitutto è bene distinguere tra gli svegliatori monastici (di piccole dimensioni, costruiti in ottone con la tecnologia già sviluppata per gli astrolabi) e gli orologi da torre (di grandi dimensioni, in ferro). Mentre le testimonianze sugli orologi da torre si arrestano all'inizio del Trecento, i documenti scritti sugli svegliatori risalgono fino all'inizio del Duecento, e già allora li menzionano non come novità, ma come cosa nota.

Gli orologi a pesi sono infatti citati nella prima metà del Duecento da Guglielmo di Alvernia nel suo *De Anima*, dove vengono portati come esempio della distinzione tra le cose animate dal Creatore e quelle mosse dall'artificio dell'uomo, per quanto anche queste ultime possano dare l'illusione d'essere di per se stesse animate.

Altre testimonianze, di altissima poesia, ma anche di notevole importanza cronologica vengono dalle descrizioni dell'orologio nel Paradiso di Dante. Alla fine del X Canto la ruota dei beati si accomiata da Dante con un moto e un canto che vengono paragonati all'orologio.

*Indi, come orologio che ne chiami
ne l'ora che la sposa di Dio surge
a mattinar lo sposo perché l'ami,
che l'una parte e l'altra tira e urge,
tin tin sonando con sì dolce nota,
che 'l ben disposto spirto d'amor turge;
così vid' io la gloriosa rota
muoversi e render voce a voce in tempra
e in dolcezza ch'esser non pò nota
se non colà dove gioir s'insempra.*

Dopo aver costruito un orologio a verga e foliot (uno “svegliatore monastico”), in cui diverse parti si tirano e si spingono a vicenda, si può meglio apprezzare il “*che l’una parte l’altra tira ed urge*”: infatti il peso tira la corona mentre i denti della corona spingono le palette, e poi le palette a loro volta spingono i denti frenando la caduta del peso e tirandolo verso l’alto. Simoni annota che “*non era certo possibile, in così breve spazio, descrivere con maggiore efficacia lo svegliatore in azione*”. Il testo dantesco fa altresì riferimento all’uso monastico dell’orologio, la chiamata alla preghiera con il suono della campanella al mattino presto, descritta con la bellissima immagine della sposa che sveglia lo sposo perché l’ami. Quante cose in così pochi versi!

*E come cerchi in temprà d’oriuoli
si giran sì, che ’l primo a chi pon mente
quïeto pare, e l’ultimo che voli;*

*così quelle carole, differente-
mente danzando, de la sua ricchezza
mi facieno stimar, veloci e lente.*

Nel XXIV Canto Dante dà un’altra descrizione in cui si sofferma sul meccanismo delle ruote, colpito dal fatto che la prima ruota sembra immobile mentre l’ultima si muove agilissima. E cosa dire dell’*enjambement* estremo, differente-mente? Non richiama la brusca discontinuità del foliot che inverte il suo moto?

Queste similitudini dantesche sono state definite esempi di “*comparatio domestica*”, in cui i temi più alti vengono spiegati attraverso gli esempi più semplici. Tuttavia, per quanto nel Trecento gli orologi meccanici fossero cosa universalmente nota e non venissero usati in astronomia ma per regolare la vita sociale, erano pur sempre una delle meraviglie tecnologiche del tempo.

Alla metà del Trecento la meraviglia tecnologica in fatto di orologi a pesi era l’Astrario di Giovanni de’ Dondi, costruito in 16 anni di lavoro. Mostrava l’ora del giorno, le feste fisse e mobili, la posizione della luna, delle stelle fisse e dei pianeti. In alcuni casi de’ Dondi utilizzò ruote ellittiche per modellare più accuratamente le irregolarità nel moto dei pianeti. Ciò dà un’idea del grado di perfezione cui era arrivato questo genio nella realizzazione del suo capolavoro. Nonostante l’originale sia andato perduto, grazie al “*Tractatus Astrarii*” compilato dal Dondi, diverse repliche sono state costruite (la più antica a metà del 1500, altre dal 1960 in poi) e sono conservate in vari musei nel mondo [6].

Leonardo fece alcuni disegni dell’Astrario verso la fine del Quattrocento. Dello stesso periodo è l’affresco di Botticelli *Sant’Agostino nello Studio*. In esso, oltre ai libri di geometria e alla sfera armillare, compare un orologio meccanico, con una corona fiorita in luogo della barra a pesetti. L’orologio raffigurato nell’affresco ha un carattere di antichità, in quanto la corona fiorita è precedente al foliot coi pesetti regolabili, un’innovazione già diffusa nel quattrocento.

semplici degli exhibit) proposti di recente dal Teacher Institute c'è anche una versione dell'orologio a scappamento di Leonardo, "A Simple Escapement Mechanism" in Exploratorium Teacher Institute at CSTA 2007, "Timing is Everything: an Escapement and a Motion Timer".

[3] **Kapitsa**, Pyotr L. 1970, *The General Principles of the Education of Present-day Youth and General Methods of Secondary-School Physics Teaching*, Proceedings of the International Congress on the Education of Teachers of Physics in Secondary Schools, Eger, Hungary, September 1970. A cura di Brown, Kedves e Wenham, 1971, *Teaching Physics: an Insoluble Task?* (The MIT Press Classic Series).

[4] **Bernstein**, Dennis S. 2002, *Feedback Control: An Invisible Thread in the History of Technology*, IEEE Control Systems Magazine, vol. 22, n. 2, pp. 53-68, è una lezione ricca di referenze per ognuno dei dispositivi citati.

[5] Naturalmente, anche gli altri orologi hanno grande valore didattico. Come la meridiana o gnomone, che lentamente disegna coniche sul terreno, per esempio. Come il grande orologio ad acqua con sfera armillare di Su Sung, costruito verso la fine dell'anno mille e alto undici metri. O come l'orologio a pendolo, perfezionato al punto da essere utile all'astronomia e alla soluzione del problema della longitudine (Si veda Dava **Sobel**, *Longitudine*, Rizzoli 1996).

Le innovazioni nella costruzione degli orologi giustificano la lunga vita della metafora del cosmo come un orologio. L'orologio nelle sue varie forme ha accompagnato la storia dell'umanità, e ciò spiega la longevità della grande metafora del cosmo come un orologio, usata in modi diversi, per esempio da Cicerone, dagli Illuministi e da Paley. Si veda Olaf **Pedersen**, *Il Libro della Natura*, (Edizioni Paoline 1993).

Per una rassegna sulle innovazioni e la società medievale, si veda Chiara **Frugoni**, *Medioevo sul naso – occhiali, bottoni e altre invenzioni medievali*, Laterza 2001 e 2007.

[6] Alcune tavole dal *Tractatus Astrarii* sono rese disponibili da Ferdinando **Petti** su <http://dmmf.mec.uniroma2.it/orologi/dedondi.htm>. Di grande interesse è la riproduzione dell'Astrario realizzata da Carlo **Croce**, <http://www.clockmaker.it/37astrario.htm>, con molte fotografie e spiegazioni.