

Evoluzione dell'orologio

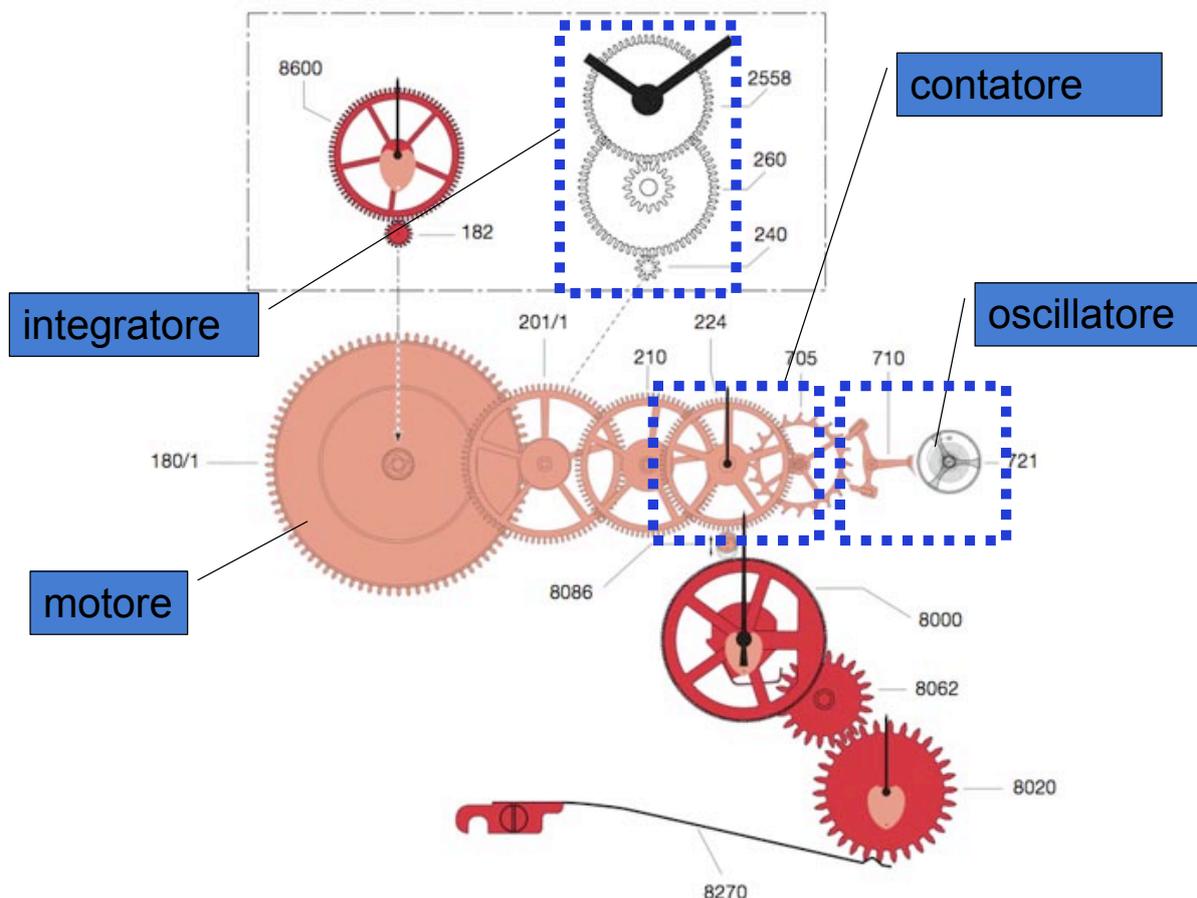
Daniele Marini
Dipartimento di Informatica e
Comunicazione

Le tappe principali

- < 1550 – contare le ore
- 1600 –1675 – l'età della decorazione
- 1675 –1700 – pendolo e bilancere
- 1700 –1775 – ricerca della precisione
- 1775 –1830 – i primi cronometri
- 1830 –1900 – l'età della complicazione
- 1900 – 1970 – l'industrializzazione
- 1970 – 1990 – l'era dell'elettronica
- > 1990 – *ritorno al futuro*

La struttura funzionale

- Motore
 - ◆ Pesi, molla, trasmissione della forza
- Elemento oscillante
 - ◆ Pendolo, bilancere
- Contatore di oscillazioni
 - ◆ Ingranaggi, lancetta secondi
- Integratore (contatore di ore e minuti)
 - ◆ Ingranaggi, lancette minuti e ore
- Display
 - ◆ Quadrante



Cos'è un orologio preciso?

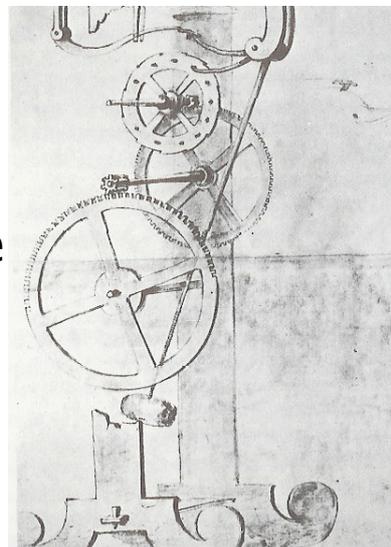
- Si può conoscere il momento del passaggio al meridiano di un astro con la precisione di $\pm 0.04''$ usando strumenti ottici a visione diretta
- Con tecniche fotografiche la precisione può aumentare a $\pm 0.009''$
- Comparando un orologio meccanico al momento del passaggio se ne determina il tasso di guadagno o ritardo

Progettare un orologio preciso

- Un meccanismo che misura e registra intervalli di tempo eguali *indefinitamente*
- Soluzioni:
 - Ripetere ciclicamente una sequenza di intervalli fissi e rigorosamente eguali
 - Ripetere un ciclo di intervalli in cui piccole variazioni di durata non hanno influenza sul ciclo complessivo

Dalla verga al pendolo

- Il meccanismo a verga e *foliot* dello svegliatore monastico ha grandissimi errori
- Galileo inventa il pendolo, 1581; afferma che il periodo di oscillazione è indipendente dalla ampiezza dell'arco
- Propone anche un orologio a pendolo, forse mai realizzato, o forse realizzato dal figlio



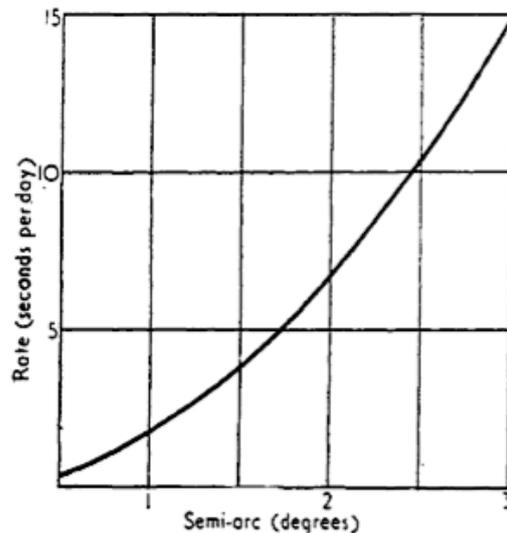
Errore circolare 1

- Huygens, 1658, costruisce un orologio a pendolo
- Nel 1673 dimostra che il periodo non è indipendente dall'arco: ciò vale solo se il moto è armonico e quindi per piccole oscillazioni (l è la lunghezza, g è l'accelerazione di gravità)

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left[1 + \frac{l^2}{2} \sin^2 \frac{\alpha}{2} + \left(\frac{l}{2} \cdot \frac{3}{4} \right)^2 \sin^4 \frac{\alpha}{2} + \dots \right]$$

Errore circolare 2

- Il diagramma indica la variazione giornaliera al crescere del semiarco di oscillazione
- Questo errore è chiamato *errore circolare*



Pendolo cicloidale

- Huygens dimostra anche che se l'arco è una cicloide il periodo risulta indipendente dall'arco
- Costruisce un orologio con un limitatore dell'oscillazione composto da due "guance" ad arco
- L'alternativa al pendolo cicloidale è di *convivere* con l'errore circolare pur di mantenere l'oscillazione costante

L'orologio di Huygens

- Notare che è mosso da una molla e non dai pesi!



Variazioni di oscillazione

- Possono essere dovute a vari fattori:
 - ◆ Variazioni di temperatura, che provocano allungamenti o accorciamenti del pendolo
 - ◆ Variazioni di pressione, che modificano la spinta di galleggiamento di un oggetto, la risultante tra gravità e galleggiamento di conseguenza varia

Compensare la temperatura

- Il periodo varia come la radice della lunghezza; una variazione di 1° produce variazioni di lunghezza sui diversi materiali che danno luogo a variazioni in sec/giorno:
 - Piombo 1.2
 - Zinco 1.1
 - Bronzo 0.8
 - Acciaio 0.5
 - Legno 0.1 - 0.2
- John Harrison (1693–1776) ideò il *gridiron pendulum*, una sospensione a griglia composta da metalli diversi il cui allungamento reciproco compensa e annulla l'allungamento totale

Compensazione del pendolo

- Pendolo a griglia del primo orologio di Harrison
- Pendolo a mercurio di orologio moderno, inventato da G. Graham



Compensazione della pressione

- La soluzione ideale sarebbe di porre l'orologio in un contenitore stagno invariante alla pressione
- Alternative sono forme della massa sospesa del pendolo con minimo "galleggiamento", spesso hanno quindi forma lenticolare

Errore dovuto allo scappamento ₁

- Se fosse lasciato libero il pendolo si fermerebbe per attrito con l'aria e per altri attriti dovuti alla sospensione
- Occorre mantenerlo in moto, l'azione viene chiamata *impulso* ed è compiuta dallo scappamento
- L'errore di scappamento è dovuto alla variazione di velocità
 - ♦ In un moto armonico il tempo per andare dalla posizione verticale $\alpha = 0$ alla posizione α è proporzionale al rapporto α/α_0 dove α_0 è l'ampiezza dell'oscillazione

Errore dovuto allo scappamento 2

- ◆ Se l'ampiezza di oscillazione cresce il tempo di spostamento si riduce
- ◆ Si supponga che il pendolo riceva un impulso all'angolo α_1 nella direzione del moto in modo da crescere l'ampiezza ad α'_0
- ◆ Il tempo impiegato per andare da 0 a α_1 è proporzionale a α_1/α_0
- ◆ Ma la nuova ampiezza rende il tempo proporzionale a α_1/α'_0 quindi inferiore e il sistema ha guadagnato tempo

Errore dovuto allo scappamento 3

- Airy (1827) verificò che per rendere trascurabile l'errore da scappamento era sufficiente renderlo costante, ovvero *conviverci*.

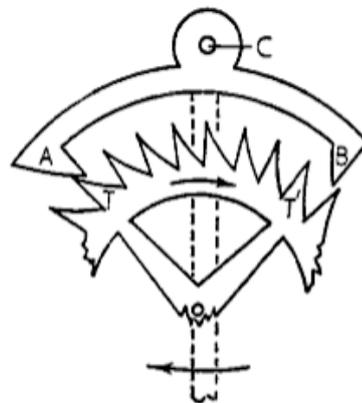
Variazione di scappamento

- Ci sono due tipi principali di scappamento:
 - ♦ A riposo con frizione
 - ♦ A distacco
- Nel tipo a riposo con frizione lo scappamento rimane a contatto con l'elemento oscillante anche dopo aver dato l'impulso

Scappamento ad ancora

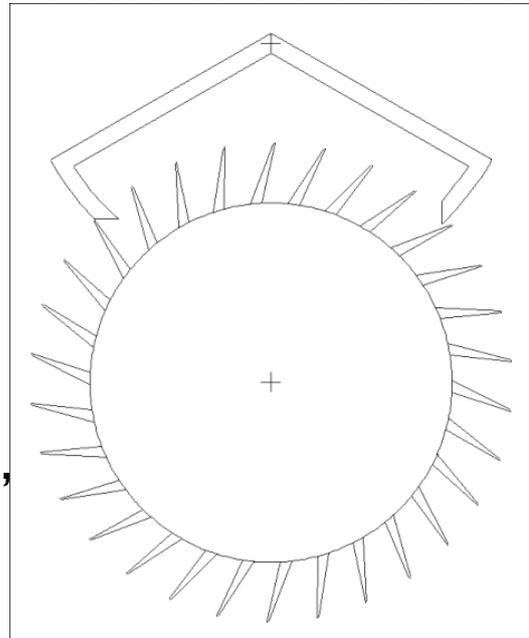
- Ideato da Robert Hook (1635–1703) è un meccanismo a ***rinculo*** (*recoil*)

- <http://www.abbeyclock.com/brecoil.html>



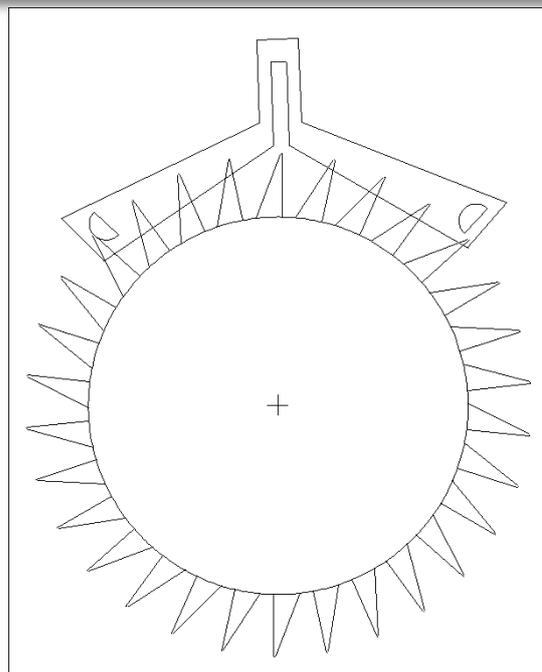
Scappamento senza rinculo

- Ideato da G. Graham, chiamato anche **dead beat** <http://www.abbeyclock.com/bbigrhm.html>
- L'assenza di rinculo riduce lo spreco di energia indotto dal movimento retrogrado, elimina attriti aggiuntivi, l'impulso è simmetrico



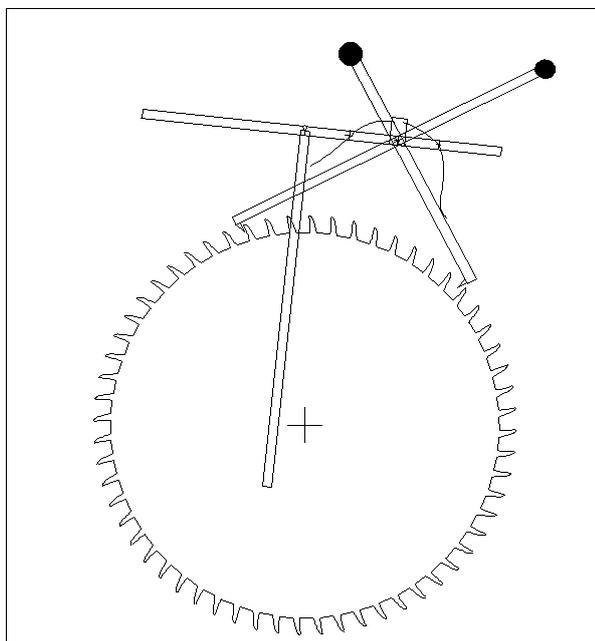
Scappamento di Brocot

- **L'abbiamo già incontrato!**
- <http://www.abbeyclock.com/bbrocot.html>
- Più economico, è senza rinculo



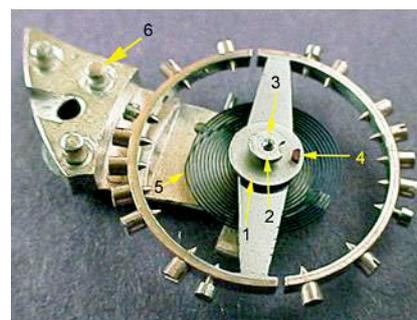
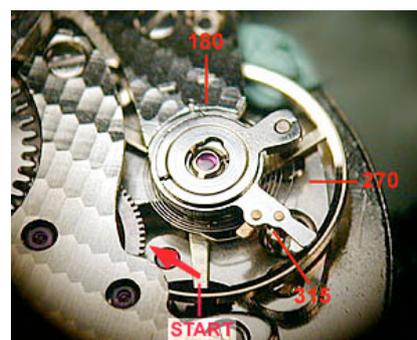
Scappamento di Harrison

- Chiamato anche *grasshopper* (cavalletta)
- <http://www.geocities.com/mvhw/grassh.html>
- Ideato da John Harrison non richiede lubrificazione in quanto l'impulso non avviene per frizione ma per spinta o trascinamento



Orologi da tasca

- Negli orologi da tasca l'elemento oscillante non è il pendolo ma il bilancere
- Basato su una molla a spirale, inventata da Huygens, è anch'esso soggetto a problemi
- La legge di Hook, anziché quella del pendolo, regola l'oscillazione



Legge di Hook

- ♦ La forza di richiamo esercitata da una molla è proporzionale, secondo un coefficiente di elasticità k , allo spostamento x dalla sua condizione di riposo ed ha verso contrario ad esso:

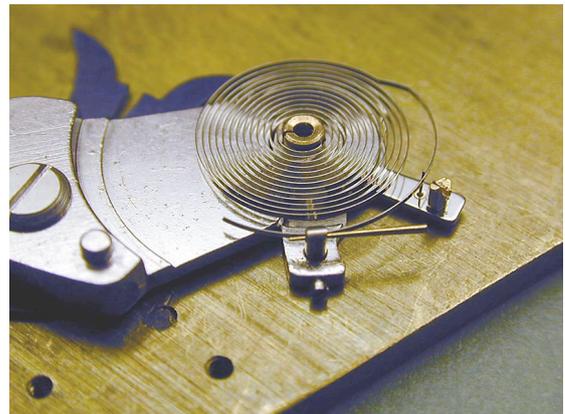
$$\vec{F}_{el} = -k \vec{x}$$

- ♦ Se una massa m viene vincolata ad una molla posta su un piano orizzontale e la molla viene allungata e poi lasciata libera, la massa compirà delle oscillazioni armoniche con un periodo pari a

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

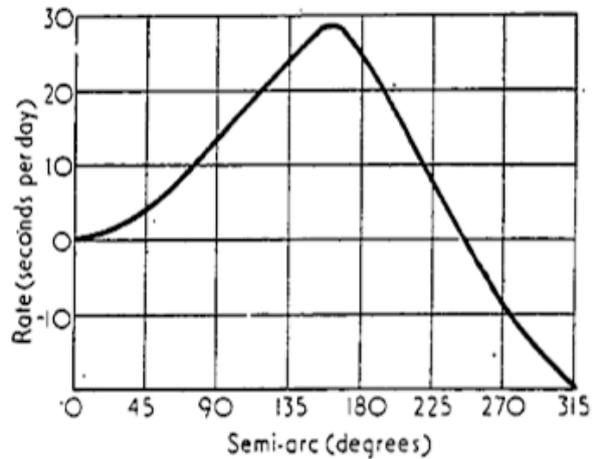
Errori

- Le molle reali non obbediscono alla legge di Hook
- Poiché la molla è fissata in due punti durante l'oscillazione cambia di forma e il suo centro di massa si sposta introducendo una forza laterale
- Una soluzione è la spirale di Breguet



Variazioni di ampiezza

- Come per il pendolo, l'oscillazione è armonica per piccoli angoli
- Si può convivere con l'errore se l'ampiezza resta costante
- L'errore dovuto alla variazione di ampiezza di oscillazione può essere molto elevato



Errori di temperatura

- Le variazioni di marcia indotte da variazioni di temperatura sono più complesse che nel pendolo
- Sia la spirale sia il bilancere si deformano
- La soluzione è di adottare materiali a bassa deformazione termica o soluzioni a compensazione
 - ♦ Bilancere bimetallico
 - ♦ Spirale e bilancere INVAR

Lo scappamento dell'orologio a bilancere

- Anche in questo caso ci sono molte varianti
- I primi orologi avevano scappamento a verga come lo svegliatore monastico
- T. Tompion e G. Graham inventarono lo scappamento a cilindro
- <http://www.abbeyclock.com/bcyl.html>
- Innumerevoli attriti, ma più preciso della verga



Lo scappamento Duplex

- Usato su orologi per il mercato cinese
- <http://www.abbeyclock.com/duplex.html>



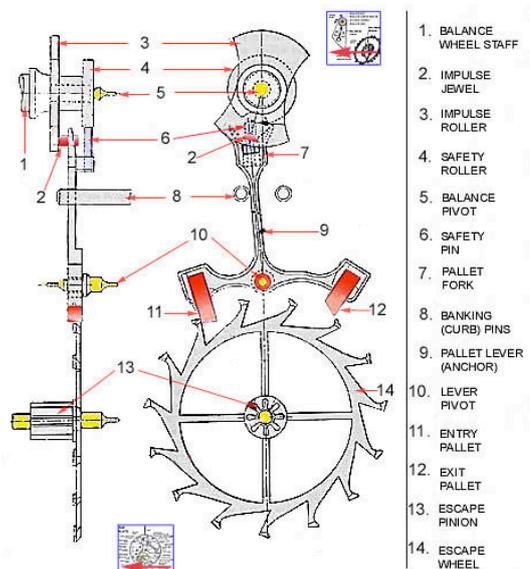
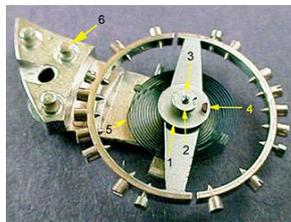
Ancora inglese

- Chiamato anche **english lever**
- <http://www.abbeyclock.com/buk.html>
- È un meccanismo a distacco, come il duplex, durante la fase di blocco il bilancere è libero



Ancora svizzera

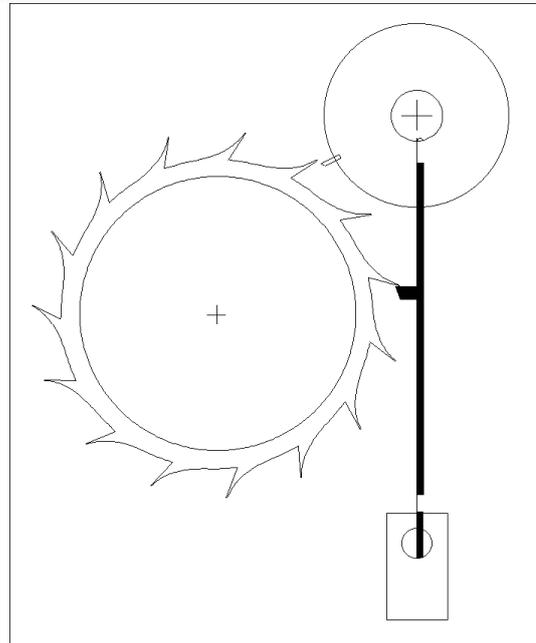
- **Swiss lever**
- <http://www.abbeyclock.com/bwatch.html> è il sistema ormai più diffuso negli orologi meccanici, è a distacco in quanto la forchetta dell'ancora riceve solo l'impulso dal bilancere e lo trasmette allo scappamento



Scappamento cronometrico

- Ideato da Earnshaw (1749–1829) è un sistema a **distacco**, è considerato il più efficiente

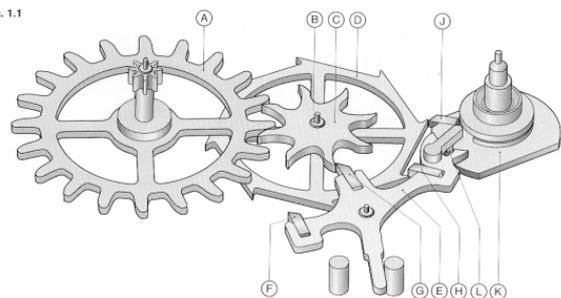
- <http://www.abbeyclock.com/bchrono.html>



Scappamento coassiale

- <http://www.abbeyclock.com/coaxial.html>
- Ideato da George Daniels (vivente) per evitare lubrificazione
- E' tutt'ora in sperimentazione, montato da **Omega**
<http://www.hebdomas.com/stuff/coaxial.html>
- sul modello De Ville
- non sono passati ancora un numero sufficiente di anni per certificare l'assunzione di Daniels

Fig. 1.1



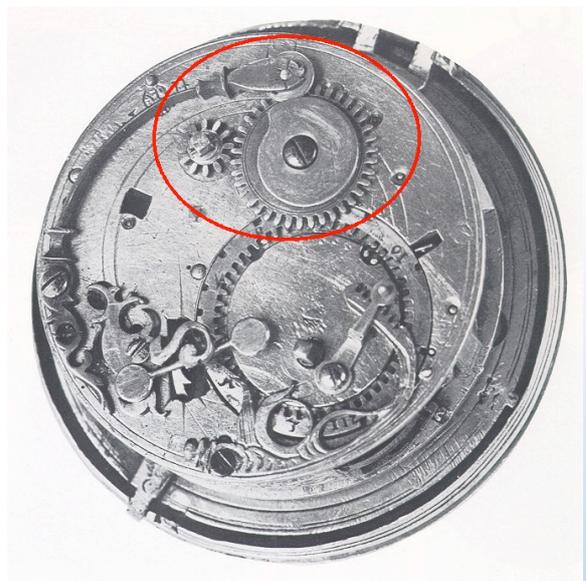
Waterfinder.co.uk
© 2006

Il problema del motore

- Inizialmente gli orologi a pendolo erano azionati da pesi avvolti su bariletti
- Già nel '500 in Germania appaiono i primi orologi a molla
- La forza della molla varia: quando è avvolta la massimo è massima e via via si riduce

Mantenere coppia costante

- Inizialmente per mantenere costante la coppia generata dalla molla si usava una camma su cui agiva una seconda molla che variava la forza esercitata sull'asse azionato dalla molla principale, chiamata *stackfreed*



Il conoide

- Una seconda soluzione, usata sia su pendole sia su orologi da tasca, è il conoide o *fusee*, su cui si avvolge un filo o una catena agganciata al bariletto della molla
- Nel conoide ad ogni spira cambia il raggio e quindi la coppia esercitata sugli ingranaggi compensando la variazione della forza della molla



Nuovi materiali

- Lo sviluppo di nuovi materiali ha permesso di avere molle con comportamento più costante
- Inoltre si progettano molle che possono essere sfruttate nella regione di linearità