

La misura del tempo: prospettiva storica

Mascheretti Paolo

Dipartimento di Fisica ‘A. Volta’, Università di Pavia

Indice

1	Una premessa	1
2	La misura del tempo	5
3	Gli strumenti	6
3.1	Meridiane: giochi d’ombre	7
3.2	Clessidre e orologi ad acqua	16
3.3	Gli svegliarini monastici: precursori degli orologi meccanici	19
3.4	Orologi su torri e campanili	24
3.5	Gli orologi astronomici da torre	25
3.6	Gli astrarii	31
3.7	La corsa all’orologio portatile	33
3.8	La ricerca della precisione	39
3.9	Oltre l’orologio meccanico	53
4	Note	59

1 Una premessa

Il rapporto tra la specie umana e il tempo risale certamente a epoche molto antiche della storia evolutiva della nostra mente: la “sensazione del tempo” divenne parte integrante del nostro patrimonio psichico forse agli albori della stessa consapevolezza di sé che caratterizza gli individui della specie cui apparteniamo.¹

Lo stabilirsi di questa sensazione del tempo interiore come “legante” degli stati soggettivi di coscienza deve però essersi intrecciato assai presto alla formazione di un’idea in un certo senso parallela di “tempo oggettivo” nel quale collocare le sequenze di eventi del mondo esterno,

indotta dapprima dalla percezione e poi dall'osservazione di fenomeni connessi a variazioni negli aspetti dell'ambiente.

Tra questi, alcuni fenomeni costituenti un severo condizionamento della vita dei nostri progenitori giocarono senza dubbio un ruolo rilevante nel “pilotare” l'evoluzione di questo processo. Mi riferisco soprattutto all'alternarsi del giorno e della notte e al succedersi delle stagioni.

Per migliaia di generazioni, infatti, con l'avvento del buio, la caccia e la raccolta di cibo dovevano interrompersi, l'ambiente diventava molto meno controllabile, i pericoli (reali e immaginati) aumentavano di numero e di gravità: le albe e i tramonti, la durata e l'estensione del percorso del Sole, i punti di levata e quelli in cui l'astro sparisce sotto l'orizzonte dovettero perciò essere percepiti e osservati con ansiosa attenzione.

Su una scala di periodicità più estese, i cambiamenti stagionali imponevano variazioni nel ritmo di vita per altri versi altrettanto drastici. Il passaggio dalla stagione monsonica a quella arida nelle savane dell'Africa orientale o la transizione da una fase all'altra del più articolato ciclo delle stagioni in Europa, con i cambiamenti nel comportamento degli animali e nella vegetazione, imponevano alle primitive comunità di cacciatori/raccoglitori umani lunghi spostamenti al seguito delle mandrie selvagge, mutazioni nell'alimentazione e nei ripari, variazione nella stessa organizzazione sociale dei gruppi.

Questo complesso insieme di fattori incise profondamente sulle concezioni primitive del mondo. In particolare, fu probabilmente il succedersi indefinito di fenomeni ciclici come quelli soprariocordati a indurre – generazione dopo generazione per molte migliaia di anni – la formazione di un concetto di tempo indipendente dai fenomeni, anzi *nel* quale (o *lungo* il quale) i fenomeni si dispongono in sequenza come su uno sfondo immobile e continuo.

Da questo momento in poi il concetto di “tempo” fu uno degli organizzatori cognitivi fondamentali (insieme al concetto di “spazio”, per il quale si potrebbe fare un discorso per molti versi assai simile) entro il quale collocare ogni descrizione o interpretazione delle cose e delle loro trasformazioni.²

Tuttavia, accanto a questa idea del tempo come un “assoluto” si sviluppò anche un atteggiamento concettuale assai diverso quando, all'interno delle periodicità dei vari fenomeni che abbiamo ricordato (e ai quali ora, tra gli altri, aggiungiamo il ricorrere ciclico delle fasi lunari),

vennero notate delle correlazioni. Per esempio, nel bagaglio culturale dei cacciatori erranti al seguito delle mandrie di erbivori alle alte latitudini dell'Europa di trenta o quaranta migliaia di anni fa, entrò senza dubbio il dato derivato dall'esperienza che l'avvento della bella stagione, insieme alle nascite di puledri e vitelli, portava sistematicamente giornate via via più lunghe. La "stagione delle nascite" (che inizia il ciclo delle stagioni) poteva quindi essere prevista in anticipo (indipendentemente dall'andamento meteorologico che può presentare variazioni anche vistose da un'annata all'altra): il ciclo annuale era "controllabile" dalla modulazione del periodo di luce del ciclo giornaliero.

Questa abilità di usare un fenomeno ciclico per ricavare informazioni sull'andamento temporale di un altro fenomeno si perfezionò nel volgere dei millenni con l'invenzione di modi per registrare e contare la successione dei cicli.

Non conosciamo nulla delle fasi di questa remota evoluzione del pensiero sul tempo, fusa com'è dentro la storia quasi altrettanto oscura dell'evoluzione culturale dell'uomo. Se un'idea di tempo come "scenario" continuo della vita individuale e di quella della comunità è condizione necessaria per giustificare i rituali di seppellimento, questa idea potrebbe risalire in Europa al Mousteriano, l'ultimo periodo del Paleolitico medio.

Di fatto, le prime testimonianze materiali di una visione del mondo comprendente una concezione del tempo si trovano probabilmente in manufatti appartenenti alla cultura del successivo periodo, l'Aurignaziano, che testimonia una svolta radicale nell'evoluzione del pensiero. Mentre infatti i primi due milioni e mezzo di anni di evoluzione culturale sono documentati unicamente da attrezzi litici strettamente utilitari, all'inizio di questo periodo (circa 35000 anni fa) insieme a nuovi tipi di utensili appaiono per la prima volta oggetti di natura simbolica, come ornamenti personali (perline, ciondoli, ecc.) e rappresentazioni bi e tridimensionali di animali. Molte di queste immagini figurative, pur rispondendo a esigenze realistiche, portano motivi astratti che ricorrono di sito in sito su vaste zone del territorio europeo e perciò fanno pensare a segni e simboli comuni a grandi entità sociali a scala regionale.³ Segni analoghi su manufatti non figurativi sono interpretati come decorazioni codificate di oggetti di ornamento. Tra questi, però, una placchetta in avorio di mammut rinvenuta in un sito della Francia (Figura 1) ha dato luogo a una suggestiva ipotesi assai diversa: essa porta su una faccia una serie

di incisioni puntiformi appaiate che alcuni studiosi hanno interpretato come una registrazione delle fasi lunari comprese entro il periodo di un anno. In altre parole, si tratterebbe di un primitivo calendario lunare.



Figura 1: lamina in avorio di mammut (circa 30000 anni a. C.). Le incisioni puntiformi sono state interpretate come un calendario lunare.

Incisioni analoghe su placchette in avorio risalenti alla cultura magdaleniana (15 - 20000 anni fa) e riconoscibili come rappresentazioni assai realistiche di salmoni suggerirebbero una utilizzazione del calendario lunare in relazione al ciclo vitale di questa specie.⁴

Non sapremo mai in quali circostanze questi nostri lontani antenati si resero conto che tra ogni migrazione dei salmoni e la successiva intercorre la stessa quantità di cicli lunari. A questa scoperta (quasi certamente estesa a corrispondenze con altri cicli biologici a cadenza annuale) contribuirono probabilmente da un lato la facilità con la quale può essere definito lo stesso ciclo lunare (consentita dal mutevole aspetto della Luna, senza dubbio oggetto di affascinata attenzione fin da quei tempi remoti) e dall'altro il fatto che, con i suoi 29 giorni e 13 ore, l'intervallo temporale tra due successivi pleniluni (il mese lunare) consente di coprire l'arco di tempo di un anno mediante un computo relativamente semplice (circa 12 lunazioni).

Un computo analogo dei giorni contenuti in un anno comporta difficoltà molto maggiori, soprattutto perché presuppone una definizione precisa dello stesso anno solare. Esso sarà effettuato in epoca protostorica come risultato di osservazioni del cielo compiute per generazioni, soprattutto del Sole all'alba e al tramonto, quando è possibile vedere che posizione occupa, col passare dei giorni, rispetto alle stelle del firmamento. Condotte nell'Egitto neolitico e nella Mesopotamia del V millennio a. C. sia per motivi magico - religiosi sia per cause connesse all'utilizzazione delle piene nell'agricoltura, queste osservazioni portano,

nell'Egitto predinastico, alla definizione dell'anno solare come l'intervallo tra due successive levate eliache di Sirio: l'inizio di ogni anno, cioè, cade nel giorno in cui la stella Sirio sorge appena prima del Sole. La durata dell'anno in giorni risulta dal computo sistematico di uno stesso numero di giorni tra due successive levate simultanee della coppia di astri: 1461 ogni quattro cicli solari, pari a 365 giorni e 1/4 per anno.⁵

2 La misura del tempo

Gli esempi precedentemente citati, anche se tratti dal passato più remoto, mostrano le caratteristiche fondamentali della misura del tempo. In effetti, come tutti i processi di misura, anche la misura del tempo si realizza per confronto con un campione: precisamente, per confronto della *durata* di un dato fenomeno con la *durata di un fenomeno campione*. Ciò comporta l'esplicitazione di una procedura e (per le scale temporali dell'ordine o inferiori al giorno) l'utilizzazione di uno strumento (orologio o cronometro) che nel suo meccanismo di funzionamento presenti un *fenomeno di riferimento*, caratterizzato da una certa durata e che si possa ripetere indefinitamente o per un intervallo temporale sufficientemente esteso; la durata del fenomeno di riferimento viene indicata come *tempo proprio* dell'orologio.

Nel corso della evoluzione storica della misura del tempo sono stati utilizzati molti tipi di fenomeni di riferimento: oltre a quelli basati su movimenti astronomici, sono stati impiegati flussi d'acqua o di sabbia nelle clessidre e in strumenti più complessi, flussi a intermittenza in altri tipi di orologi ad acqua, movimenti rotatori uniformi (mantenuti in regime stazionario da attriti di strisciamento o da attriti in aria o in acqua), oscillazioni di vario tipo (dovute a fattori inerziali, di rilassamento, elastici), rotazioni uniformi pilotate da motori elettrici, processi di carica e scarica di condensatori, vibrazioni elastiche macroscopiche e microscopiche, ecc.⁶

In questo ricco quadro di processi cui si è fatto ricorso per ottenere un tempo proprio da usare come campione, si possono distinguere due grandi categorie:

- i processi periodici: oscillazioni e intermittenze di varia natura fisica e origine strumentale, per i quali il tempo proprio è spontaneamente costituito dal loro stesso periodo;

- i processi ad andamento continuo, rappresentati prevalentemente da moti uniformi (circolari e rettilinei) ai quali vanno aggiunti processi particolari che si svolgono in modo uniforme, come, per esempio, la combustione di cera o di olio, il riempimento di vasi mediante getti d'acqua di portata costante, ecc.⁷

Per i processi continui, il tempo proprio dello strumento che serve da orologio va definito in modo arbitrario sulla base della velocità con la quale si svolge il processo utilizzato: generalmente è un multiplo del periodo per le rotazioni o è l'intervallo di tempo necessario perché si compia un dato cambiamento in una variabile spaziale correlata all'andamento del processo impiegato (per esempio, il livello dell'acqua in un vaso o la distanza tra tacche equidistanti predisposte lungo una candela, ecc.).

3 Gli strumenti

Come per altri aspetti dell'evoluzione culturale, anche lo sviluppo dei metodi per misurare il tempo risulta da un intreccio di interessi speculativi e di risposte alle necessità di risolvere problemi pratici inerenti all'organizzazione della vita individuale e collettiva. Questo secondo fattore si è espresso, nel corso della Storia, in una serie di "richieste sociali" che hanno condizionato fortemente la diffusione degli strumenti di misura del tempo, selezionando quelli più adatti alle esigenze delle varie epoche storiche.

La Tabella 1 riassume questo lungo processo come si è sviluppato in Occidente dal passato più remoto alle soglie del nostro secolo, esplicitando, sia pure in modo molto schematico, alcune scale di grandezza temporale dei fenomeni il cui controllo è stato socialmente significativo nelle varie epoche: il tempo dei cicli annuali della fauna e della flora per la preistoria e la protostoria, il tempo nell'arco di una giornata per organizzare la vita urbana (dalle città - stato mesopotamiche fino ai Comuni, Signorie e Stati dell'Europa) e infine la ricerca della precisione, dalla scala dei minuti nel Sei - Settecento a quella dei secondi e di intervalli ancora più piccoli nell'Ottocento fino ai giorni nostri. Percorsi altrettanto complessi e significativi che si sono sviluppati presso altre culture (specialmente in Cina e nell'America precolombiana) non sono stati trattati perché eccedenti i limiti di questo lavoro.

scala dei tempi misurati	fenomeni utilizzati	strumenti	richieste sociali	periodi
il tempo nell'anno	stagioni configurazioni del firmamento (sole, luna, stelle)	allineamenti megalitici; linee meridiane	attività della caccia attività agricole	preistoria (paleolitico e neolitico) protostoria)
il tempo nel giorno	rotazione terrestre caduta gravitativa moti periodici non armonici oscillazioni armoniche da pendolo	quadranti solari * clessidre e orologi ad acqua "svegliarini" monastici orologi da torre orologi da torre orologi astronomici orologi da camera	attività urbane (artigianato, commercio, ...) attività dei monasteri attività urbane attività urbane	dal II - III millennio a.C. al tardoimpero Alto Medioevo Comuni ... dal tardo Rinascimento ...
la ricerca della precisione	oscillazioni armoniche da pendolo e da sistemi elastici ... con scappamenti ad ancora e derivati	orologi da torre orologi da camera orologi portatili cronometri marini cronometri terrestri	attività urbane misura della longitudine, commercio, viaggi, astronomia, ... ingegneria (...)	... al XVII secolo dai viaggi di scoperta (1600 - 1800) alla rivoluzione industriale

* Quadranti solari e meridiane vengono usati per controllare gli altri tipi di orologi fino a Ottocento inoltrato.

Tabella 1

3.1 Meridiane: giochi d'ombre

Il metodo di misurare il tempo dalla posizione e dalla lunghezza delle ombre proiettate dal Sole risale certamente al più remoto passato con la scoperta del fatto che le ombre, assai lunghe al mattino e alla sera, hanno un minimo a metà della giornata e con l'altra scoperta che tale minimo è variabile nel corso delle stagioni e precisamente è più corto durante le giornate della mezza estate e più lungo nelle brevi giornate del cuore dell'inverno.

Da queste due osservazioni si sviluppa lo studio delle ombre di un'asta (la *gnomonica*), mirato alla realizzazione dei due tipi di strumenti solari per la misura del tempo:⁸

- il quadrante (o orologio) solare per la misura del tempo giornaliero (detto comunemente anche “meridiana”);
- e la vera e propria meridiana o “linea meridiana”, con funzioni calendariali, cioè di misura del tempo annuale.

I più primitivi quadranti solari (di cui si ha traccia in reperti archeologici dell’antico Egitto) erano costituiti da un’asta verticale che proiettava la propria ombra su un piano orizzontale, sul quale un insieme di linee ugualmente spaziate uscenti dal piede dell’asta suddivideva il tempo della giornata. (Si conoscono anche versioni con asta orizzontale infissa in un muro rivolto a sud, con un “ventaglio” di linee equispaziate incise nel muro). Si trattava dunque di una partizione in intervalli temporali disuguali e variabili con la stagione in relazione alla diversa altezza del Sole nei vari periodi dell’anno.⁹

La linea corrispondente all’ombra più corta (la *linea meridiana*) assunse presto un’importanza speciale, al punto da costituire l’unico elemento orizzontale del quadrante: corredata da un insieme di tacche in corrispondenza a particolari giorni distribuiti nell’arco dell’anno e comprese tra due posizioni estreme (il solstizio d’estate e quello d’inverno) servì a misurare il tempo nell’anno, più precisamente a indicare il posto di ogni giorno nel calendario.¹⁰

La partizione del piano di proiezione dell’ombra in settori equitemporali venne realizzata più tardi, ricorrendo a una configurazione geometrica diversa, che costituisce la cosiddetta meridiana equatoriale.

Il principio su cui si fonda il funzionamento di una meridiana equatoriale e la sua capacità di indicare intervalli temporali uguali indipendentemente dalla diversa altezza del Sole nei vari periodi dell’anno può essere mostrato con particolare immediatezza considerando la Terra stessa come un gigantesco orologio solare.

Se un immaginario disco equatoriale (già corredata da una suddivisione in 24 parti uguali: angolo al centro di 15 gradi tra una linea di suddivisione e la successiva) venisse “estratto” dalla sfera che rappresenta il pianeta insieme all’asse di rotazione (Figura 2a), è evidente che, per effetto della rotazione diurna della Terra (o del Sole in un sistema di riferimento geocentrico), l’ombra dell’asse sul disco stesso ruoterebbe da una partizione all’altra nel corso di un’ora per qualunque altezza del Sole sul piano equatoriale.

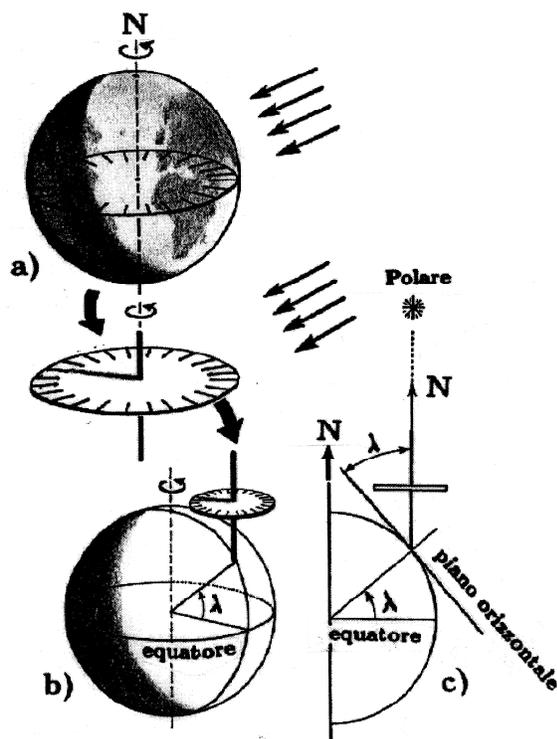
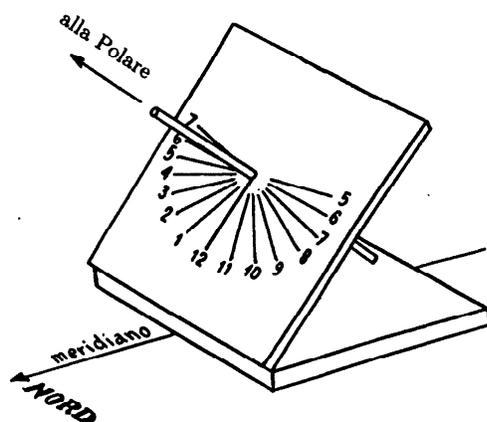


Figura 2: la Terra come meridiana equatoriale fondamentale.

Se ora immaginiamo un disco analogo fissato sulla superficie terrestre nella posizione in cui si vuole costruire la meridiana e con l'asse (materializzato per esempio da un'asta) parallelo all'asse terrestre (come, senza rispettare proporzioni realizzabili, mostra la Figura 2b), è evidente che il Sole "gioca" con l'ombra dell'asse esattamente come nel caso della Figura 2a; l'asse del disco si chiama "stilo" dell'orologio solare, e la sua ombra si adagia successivamente sulle varie linee orarie in funzione della sola rotazione terrestre e indipendentemente dall'altezza del Sole. Dalla Figura 2b si ricavano anche i parametri fondamentali che devono essere rispettati perchè la meridiana sia fedele, in relazione alle coordinate geografiche del sito: lo stilo (che deve essere perpendicolare al piano su cui sono tracciate le linee orarie distanziate di 15 gradi e che costituisce il "quadrante" dell'orologio solare) deve giacere nel piano meridiano del

sito e formare con un piano orizzontale un angolo uguale alla latitudine. (Di conseguenza, il quadrante è parallelo al piano equatoriale della Terra).

La Figura 2c riassume queste condizioni.



La figura mostra la faccia settentrionale della tavola, sulla quale lo stilo proietta l'ombra dell'equinozio dall'equinozio di primavera all'equinozio di autunno. In questo periodo il Sole sta al di qua del piano della tavola raggiungendo la sua massima altezza al mezzogiorno del solstizio estivo. Anche sulla faccia opposta della tavola, però, sono indicate linee orarie, sulle quali l'ombra dello stilo segna le ore dei giorni del semestre che comprende il solstizio invernale, cioè quelli che vanno dall'equinozio d'autunno all'equinozio di primavera.

Figura 3: meridiana equatoriale.

Una versione particolarmente semplice dal punto di vista costruttivo è mostrata in Figura 3, nella quale al disco si è sostituita una tavoletta rettangolare.

Questa meridiana è la base per capire il funzionamento di una vasta tipologia di orologi solari che si differenziano sia per la forma e la collocazione del quadrante, sia per la configurazione delle linee orarie.

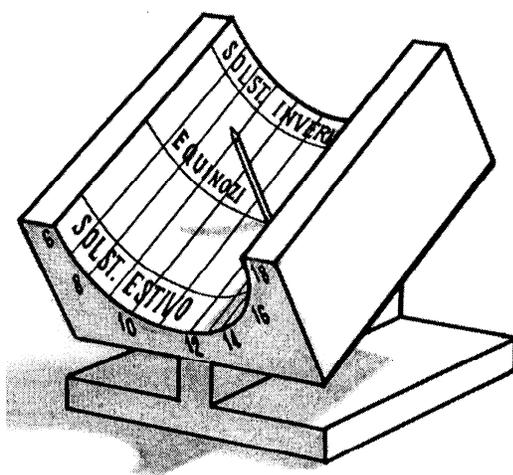


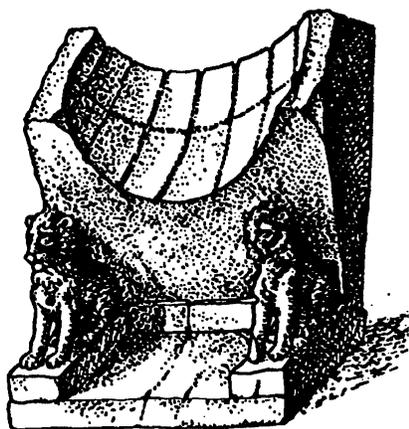
Figura 4: meridiana equatoriale cilindrica.

Il quadrante piano, può, per esempio, essere sostituito da una superficie cilindrica il cui asse sia puntato sulla Stella polare. Un'asta perpendicolare alla superficie del cilindro, disposta nel piano verticale che divide il semicilindro a metà e la cui estremità sia sull'asse (come in Figura 4), proietta la sua ombra sulla superficie cilindrica (della quale le linee orarie non sono che generatrici) percorrendola al ritmo di 15 gradi all'ora. In questo caso l'ora è indicata dall'ombra della sola punta dell'asta che, per questo motivo, è chiamata "gnomone".

E' interessante notare che nel corso di una giornata soleggiata l'ombra della punta dello gnomone segue un percorso che è un semicerchio con centro sull'asse del cilindro. I percorsi dei due giorni equinoziali coincidono e comprendono il piede stesso dello gnomone, mentre quelli del solstizio estivo e del solstizio invernale sono in posizioni estreme rispettivamente verso Sud e verso Nord. Corredando la superficie cilindrica anche di queste tre tracce semicircolari (e, a maggior ragione, aggiun-

do quelle corrispondenti al primo giorno di ogni mese o dei vari periodi dello zodiaco) l'orologio solare costituisce anche un datario. Un unico strumento può assolvere così, mediante due distinti apparati di lettura, sia il compito di misurare il tempo del giorno, sia quello di misurare il tempo dell'anno.

Una variante al tipo a quadrante cilindrico è costituita dalle meridiane a quadrante sferico, la cui diffusione nel mondo antico è provata da un abbondante numero di reperti archeologici e di cui la Figura 5 mostra un esemplare romano del I secolo d. C. (privo dello gnomone).¹¹



L'asta dello gnomone, ora perduto, usciva dal centro della superficie sferica in modo che la punta fosse situata al centro della sfera.

La punta dello gnomone diventa, così, il centro di una omotetia tra la volta celeste e la superficie dell'orologio: ad ogni punto del cielo compreso tra i due percorsi estremi del Sole corrisponde un punto della superficie dell'orologio; ad ogni arco di cerchio diurno attraversato o percorso dal Sole, corrisponde sulla semisfera un arco che ne è l'immagine.

Mentre questo esemplare si limita a riprodurre la zona di cielo interessata dal percorso del Sole, per esaltare la corrispondenza tra superficie dell'orologio solare e volta celeste, altre meridiane riproducevano l'intera emisfera.

Figura 5: meridiana equatoriale sferica: esemplare romano del I secolo a. C.

Ma certamente i tipi di orologi solari più comuni sono a quadrante piano e verticale, quelli cioè costruiti sui muri di città, castelli, ville a partire dall'Alto Medioevo fino a tutto il Settecento (Figura 6). Le pareti esposte a Sud sono le più frequentemente usate, ma non mancano quadranti solari realizzati su muri rivolti a mattino o a sera.

In questo tipo di meridiana lo stilo deve giacere nel piano meridiano del sito e formare, con una superficie orizzontale, un angolo uguale alla latitudine (vedi per esempio la Figura 7, nella quale allo stilo è sostituito



Figura 6: una meridiana da muro.

il lato di una tavoletta triangolare). Le linee orarie corrispondenti alle varie ore, pur convergendo nel “piede” dello stilo, non divergono l’una dall’altra per 15 gradi, ma sono disposte secondo una configurazione più complessa. Esse, però, non essendo altro che le proiezioni delle linee orarie di una meridiana equatoriale avente lo stesso asse possono essere ricavate da queste ultime, sia per via matematica sia in modo operativo. (Lo stesso dicasi per le meridiane a quadrante piano orizzontale, che ebbero una certa diffusione a corredo di giardini, piazze, fontane).

Lo stilo inclinato secondo la direzione della Polare può essere sostituito da un’asta perpendicolare alla parete e di lunghezza opportuna, così che a puntare verso la Polare sia la congiungente l’estremità dell’asta con il punto di convergenza delle linee orarie.

Anche in questo caso l’asta è uno gnomone perché l’ora è indicata dall’ombra della punta.

La curva che l’indice percorre nel corso della giornata è un’iperbole. Col trascorrere delle settimane e dei mesi, i vari percorsi giornalieri passano da una iperbole limite superiore (corrispondente al solstizio d’inverno) a una limite inferiore, corrispondente al solstizio estivo; il percorso equinoziale è una retta. Se fornita di queste indicazioni, dunque,

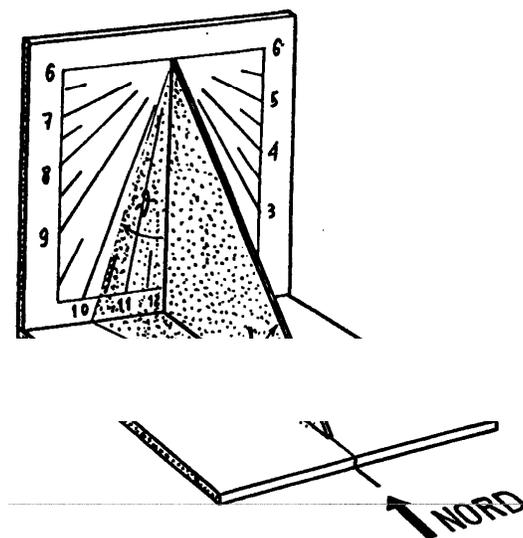


Figura 7: meridiana verticale.

anche una meridiana verticale costituisce un datario.¹²

A partire dal '600, sono giunti fino a noi anche orologi solari di ridotte dimensioni e quindi portatili (in “formato tascabile” potremmo dire). Tra i più sofisticati sono esemplari settecenteschi basati sul principio della meridiana equatoriale o a quadrante verticale o orizzontale: essi sono muniti di ago magnetico per orientare correttamente lo stilo, di sistemi a bolla o a filo a piombo per assicurare l’assetto verticale o orizzontale dei quadranti e di ingegnose soluzioni per adeguare l’inclinazione dello stilo alla latitudine dei luoghi. Questi piccoli orologi sono in grado di fornire indicazioni abbastanza precise e affidabili dell’ora; tuttavia, costruiti spesso usando materiali semipreziosi (avorio, ottone o argento, legni esotici) si rivelano espressioni di un gusto raffinato e di una passione di moda più che strumenti realizzati per una reale necessità di misura del tempo (accomunati, in questo, a coevi orologi meccanici prodotti con analoghe attenzioni ai loro aspetti estetici).

Tra gli orologi solari portatili vogliamo ricordare un tipo che si basa sulle coordinate alt - azimutali del Sole.¹³ Il suo funzionamento si basa sul fatto che, per una data latitudine di un osservatore, c’è una relazione tra l’ora, la data e, in particolare, l’altezza del Sole. Da qui la possibilità

di realizzare un orologio in grado di indicare l'ora dalla valutazione della sola altezza del Sole.¹⁴

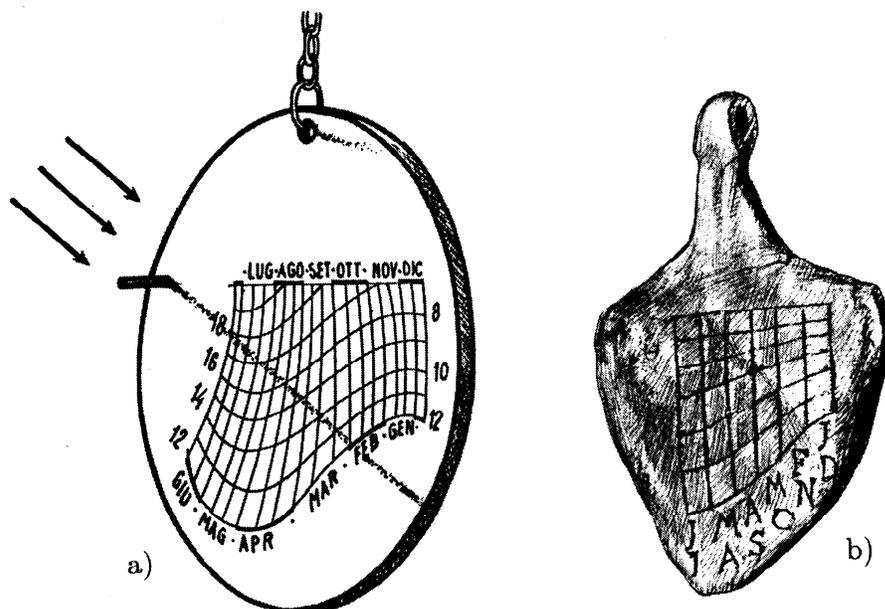


Figura 8: a) Meridiana basata sulle coordinate alt - azimutali del Sole; b) Il cosiddetto “prosciutto di portici”, meridiana alt - azimutale del I secolo d. C.

Tra le varie soluzioni costruttive ricordiamo quella forse più diffusa (suggestivamente ricordata anche come “meridiana del pastore”, Figura 8a) costituita da un disco (o da una piastra) sospeso con una catenella (che ne assicura la verticalità) e munito di uno stilo perpendicolare al suo piano e collocato nei pressi del bordo.

La lettura dell'ora si effettua orientando il disco in modo che giaccia nel piano che contiene il Sole (le due facce del disco appariranno ugualmente illuminate da luce radente). L'ombra dello stilo si proietta su un reticolo di coordinate curvilinee (disegnate o incise sul disco) che correla l'ora alla data: dalla conoscenza di quest'ultima si risale all'ora.

Circa il grafico dell'ora *versus* la data, sugli esemplari più antichi giunti fino a noi esso era ottenuto probabilmente per via empirica e si limitava a indicazioni sommarie e imprecise. (Ricordiamo, per esempio (Figura 8b), la tavoletta romana del I secolo d. C. nota, per la sua forma,

come “prosciutto” di Portici). Esempari arabi del tardo Medioevo e soprattutto del Settecento europeo, invece, sono corredati da sistemi di linee molto dettagliati ottenuti per via grafica o dal calcolo algebrico.

3.2 Clessidre e orologi ad acqua

L’uso delle clessidre accanto all’orologio solare è testimoniato fin da tempi molto antichi, verosimilmente non solo per misurare il tempo della notte ma anche come strumento da utilizzare in ambienti chiusi.

Le più antiche di cui si ha notizia sono clessidre egiziane del XVI secolo a. C., forse utilizzate in relazione alla preparazione di sostanze usate per l’imbalsamazione.

La caratteristica forma di doppio recipiente in vetro con due metà simmetriche separate da uno stretto orifizio, consente, con il pronto capovolgimento dello strumento quando termina la caduta del fluido dalla zona superiore, di estendere il controllo temporale a fenomeni di durata anche molto maggiore del “tempo proprio” della clessidra.

Il fluido tipico che scorre per gravità attraverso l’orifizio è sabbia molto fine e perfettamente asciutta. Dopo una breve fase di accelerazione conseguente al capovolgimento, il moto di caduta è pressoché uniforme, in quanto è la fase stazionaria corrispondente all’equilibrio tra la gravità e l’attrito tra i granelli di sabbia e tra questi e il vetro del recipiente. La velocità dipende dalla finezza e dalla regolarità dimensionale dei granelli, dal coefficiente di attrito (che dipende dalla natura della sabbia, cioè se calcarea, silicea, ecc.), dal diametro del foro e dal profilo dell’“imbuto” di accesso al foro. Il “tempo proprio”, cioè il tempo di svuotamento, dipende poi dalla quantità di sabbia impiegata, cioè dal volume e dalle dimensioni della clessidra. La caduta stazionaria della sabbia ha consentito di realizzare strumenti in grado di valutare sottomultipli del tempo di svuotamento grazie a opportune tacche di livello incise sul vetro o riportate sulla struttura esterna di sostegno o mediante particolari profili dei due recipienti. Una specie di “ricetta” di un maestro vetraio attivo a Venezia nel XVI secolo sottolinea l’importanza della forma dell’invaso e lascia capire che il vero segreto per il buon funzionamento di una clessidra era la dimensione relativa tra il foro e i granellini di sabbia, ma soprattutto la uniformità dimensionale di questi ultimi.

Poiché non era facile selezionare grani di sabbia delle stesse dimensioni (i comuni setacci lasciano passare anche i granelli più piccoli, quasi

altrettanto perniciosi dei grani più grandi del valor medio) fu usata acqua (e in certi casi mercurio) al posto della sabbia. Ma anche l'acqua dà luogo a inconvenienti: anzitutto, essendo il recipiente sigillato, la caduta non è propriamente continua ma è intercalata a bolle d'aria che risalgono più o meno regolarmente dal recipiente inferiore ogni volta che vi è entrata una certa quantità di acqua. (E' dunque più un flusso a intermittenza che un flusso costante). In secondo luogo, l'acqua (se non è distillata) rilascia col tempo dei depositi che opacizzano le pareti, otturano l'orifizio e intorbidano l'acqua stessa, alterando i tempi di caduta e quindi l'affidabilità della clessidra come misuratore del tempo.

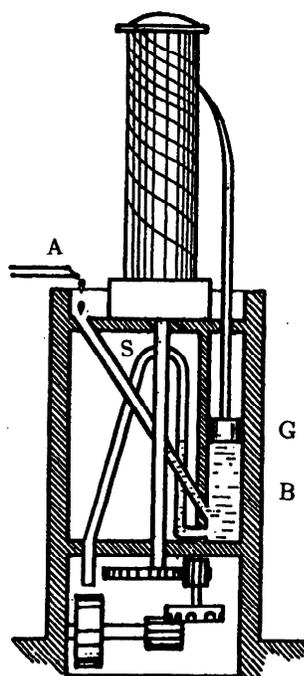
Anche se caratterizzata da questi inconvenienti e malgrado la scomoda necessità di una persona incaricata di capovolgere lo strumento ad ogni svuotamento della parte superiore e di registrarne il numero progressivo (per le più grandi ciò comportava un intervento dopo poco più di un'ora), le clessidre furono usate fino alle soglie del XVII secolo non solo come cronometri (cioè per misure di intervalli temporali limitati) ma anche come orologi veri e propri. Alla inadeguatezza intrinseca a questi strumenti di misurare il tempo per periodi più lunghi di pochi giorni, si ovviava mediante una calibrazione periodica con orologi solari.

Clessidre vennero usate a lungo anche sulle navi per segnalare i "quarti" di guardia e, forse, furono i misuratori di tempo che consentirono le prime valutazioni grossolane della longitudine (torneremo più avanti su questo argomento). In questo particolare impiego, la calibrazione veniva effettuata iniziando nuovi conteggi in corrispondenza dei transiti del Sole al meridiano, quando l'astro ha la massima altezza.

Un flusso d'acqua come fenomeno continuo da cui ricavare misure di tempo fu usato con maggior successo in strumenti più complessi delle clessidre benché, probabilmente, altrettanto antichi.

Questi veri e propri orologi ad acqua erano basati sul riempimento di un recipiente da parte di un getto d'acqua continuo (o da una fitta successione di gocce). A riempimento completato, particolari dispositivi provocavano lo svuotamento rapido del recipiente e la contemporanea registrazione automatica del riempimento stesso. La Figura 9 riproduce un disegno cinquecentesco basato sulla descrizione che Vitruvio (I secolo d. C.) dà di un orologio ad acqua proveniente dall'Asia Minore e funzionante a Roma.¹⁵

Orologi ad acqua di questo tipo erano molto diffusi sia in Occidente



In questo congegno l'acqua fluiva da un serbatoio attraverso un tubo (A) in un recipiente (B) munito di galleggiante (G) e di un'asta terminante con una punta indicatrice. Quest'ultima, man mano che l'asta veniva alzata dal galleggiante, scorreva su un diagramma con i segni delle 24 ore.

Il recipiente B era collegato a un sifone (S) che, al termine di ogni giorno, vuotava completamente B, riconducendo in basso galleggiante e asta indicatrice per consentire il flusso del giorno dopo.

L'acqua scaricata dal sifone, però, mediante un riduttore a ruote dentate, faceva ruotare di $1/365$ di giro il cilindro con l'indicazione delle ore. Le linee verticali sul cilindro, corrispondenti a 36 decadi e mezzo, costituivano un datario.

Le linee orarie sono delle eliche a passo variabile perchè l'orologio era progettato per indicare ore inuguali, secondo l'uso diffuso in Roma in questo periodo. (Vedi anche la nota 9)

Figura 9: orologio ad acqua del I secolo d. C. (da Vitruvio).

sia nel Medio Oriente e in Asia Minore e il loro impiego si protrasse, senza cambiamenti sostanziali agli schemi progettuali antichi, fino al tardo Medioevo.

Anche se capaci di prestazioni assai migliori di quelle offerte dalle clessidre, l'imprecisione di questi orologi ad acqua era pur sempre notevole. Tuttavia, a partire dal XIV secolo furono perfezionati in modo così rilevante da poter essere impiegati dagli astronomi dei due secoli successivi, tant'è vero che lo stesso Tycho Brahe usò simili orologi ad acqua per compiere quelle osservazioni dalle quali Keplero derivò le leggi del moto dei pianeti.

3.3 Gli svegliarini monastici: precursori degli orologi meccanici

Con l'affermarsi del cristianesimo si gettano le basi per l'avvento di un punto di vista sul tempo profondamente diverso da quello dell'antico mondo pagano. Sotto la spinta di questo nuovo atteggiamento riguardo al tempo emergerà ben presto la necessità di strumenti radicalmente differenti per misurarlo.

Allontanandosi dall'ebraismo da cui inizialmente aveva preso molti spunti, il cristianesimo primitivo sviluppò una sensibilità tutta particolare per il tempo, considerandolo quasi un capitale da investire e far fruttificare. L'idea che la vita dopo la morte dipenda dai meriti o demeriti guadagnati dalle azioni che si svolgono nel limitato arco temporale della vita terrena, rende il tempo un prezioso alleato per il raggiungimento della felicità eterna. Nelle comunità cristiane del vicino Oriente e di Roma si instaurò quindi assai presto la pratica di preghiere quotidiane a ore fisse: in aggiunta alle orazioni del mattino e della sera – prescritte dalla Legge mosaica – dovevano praticarsi devozioni alla terza, sesta e nona ora. Queste scadenze dividevano la giornata negli stessi quarti che l'amministrazione civile utilizzava come elementi di riferimento temporale (vedi alla fine della nota 15). Tertulliano (III secolo) faceva notare che le *horae*: "...servono a fissare il tempo degli affari e sono annunciate pubblicamente". Dunque, non c'era alcun problema per sapere quando si doveva pregare perché i segnali civili sarebbero serviti anche ai fedeli.

La scelta di fissare i tempi del culto mediante l'orologio fu un importante passo in direzione di una liturgia indipendente dal ciclo naturale. Tale tendenza fu rafforzata con l'istituzione di una funzione religiosa notturna, cui seguì l'aggiunta di altre *horae*.

Col tempo, si giunse alla successione seguente, totalmente svincolata dagli eventi naturali e mirata solo a regolare minuziosamente l'amministrazione di un tempo scandito da momenti di preghiera e di devozione: *matutinum* (circa alle nostre 3), *laudes* (l'alba), *prima* (il levar del Sole), *tertia* (circa dalle 7 alle 9), *sexta* (dalle 9 alle 12), *nona* (dalle 12 alle 15), *vespera* (un'ora prima del tramonto) e *completorium* (il tramonto).

Per circa 400 anni, però, non ci furono regole precise. Fu solo nel quadro della Regola di San Benedetto (VI secolo) che questo ordine temporale dei servizi di culto ebbe la sua prima compiuta e dettagliata realizzazione.

Al di là della suggestione che i rimandi a momenti naturali possono suscitare in noi (alla quale, probabilmente, non erano indifferenti nemmeno i monaci di allora) la maggioranza di questi servizi di culto rivela di essere stabilita in riferimento a ore misurabili mediante un orologio. Di qui la formula ora “canonica” che alla fine diventò sinonimo del servizio di culto (che, infatti, veniva indicato anche con l’espressione “recitare le ore”.)

Nei secoli successivi la regola benedettina fu adottata da altri ordini e dalle grandi congregazioni che circondavano il Vaticano e le basiliche lateranensi sicché le “ore canoniche” furono definitivamente consolidate in tutto l’Occidente cristiano.

I secoli di insicurezza materiale connessa all’epoca violenta delle invasioni barbariche sconvolsero in molte regioni d’Europa anche la vita monastica. Solo nel X secolo le pressioni esterne diminuirono: la fondazione dell’ordine di Cluny (910) e il sorgere degli ordini cistercensi agli inizi del XII secolo segnarono un generale risveglio di un monachesimo rigorosamente fondato sulla disciplina. A sua volta, la disciplina non poteva che essere incentrata su una definizione e un ordinamento in termini di tempo della vita spirituale: *omnia horis competentibus compleantur* (di ogni cosa bisogna occuparsi a tempo debito). Questo nuovo rigore monastico ebbe un profondo effetto sullo sviluppo dei metodi di misura del tempo. Sul piano speculativo si diffuse infatti un interesse al calendario legato alla necessità, da parte della Chiesa (che avviava una sistemazione dell’anno liturgico), di risolvere il problema della data della Pasqua e delle altre cosiddette Feste mobili. Queste date erano fissate in conformità tanto con il ciclo lunare quanto con quello solare.¹⁶ Il problema sollecitava perciò una rinnovata attenzione all’astronomia e ai suoi tempi. Questa materia fu oggetto di attiva investigazione anche nei cosiddetti secoli bui e costituisce quasi l’unico aspetto della scienza altomedievale di cui sia testimoniato un progresso. (In ogni altro campo, infatti, quei secoli non furono che una drastica regressione dal livello di conoscenze raggiunte dagli antichi. Per la parte che non andò irrimediabilmente perduta, tali conoscenze si conservavano in manoscritti che nessuno consultava e vennero riscoperte solo quando, centinaia di anni dopo, furono importate in Europa dagli arabi e dagli ebrei di Spagna o dai bizantini).

Le preoccupazioni legate al calendario debordavano però invariabil-

mente nel campo proprio alla misurazione del tempo. Da questo punto di vista, infatti, era altrettanto pressante la necessità di inventare dei sistemi che consentissero, all'interno dei monasteri, la pratica attuazione di un servizio giornaliero di culto rigorosamente scandito dalle ore canoniche. Non sappiamo con certezza come dal VI al XII secolo i monaci regolassero i tempi della preghiera: per le ore diurne potevano contare su orologi solari, ma le veglie notturne dovevano senza dubbio costituire un serio problema. Certamente si fece ricorso a orologi ad acqua, ma a meno che alcuni membri della comunità non fossero stati disponibili a vegliare la notte per guardare l'orologio (situazione naturalmente delle più precarie) sarebbe stato fin troppo facile continuare a dormire se gli orologi non fossero stati dotati di efficienti suonerie. Documenti scritti nominano, in effetti, *artifices horologiorum* ai quali i monasteri affidavano la manutenzione degli orologi e il potenziamento delle loro suonerie, ma i risultati non devono essere stati sempre soddisfacenti: era necessario imparare a fabbricare delle sveglie basate su congegni e metodi di nuova concezione.¹⁷ La soluzione del problema deve essere stata trovata nel corso del XII secolo, con la realizzazione di congegni che potremmo paragonare ai nostri *timers* più che a orologi nel senso attuale del termine.¹⁸ Probabilmente non segnavano il tempo né funzionavano in permanenza ma erano progettati per “marciare” durante tutta la notte e servivano esclusivamente per innescare una suoneria.

Un certo numero di testi scritti consente di ritenere come assai probabile che molti di tali strumenti basassero già il loro funzionamento su un meccanismo che si ritroverà, nel '300, nei veri e propri orologi meccanici di campanili e torri di chiese e municipi.

Useremo perciò la Figura 10 (che si riferisce a un orologio tardo-medievale) per illustrare il (probabile) funzionamento degli “svegliarini” monastici (così sono spesso indicati i primi congegni meccanici a suoneria).

Mediante riduzioni a ruote dentate, un asse (il *treno* – o *traino* – *del tempo*) riceve un moto di rotazione da un sistema di gravi. Il treno è solidale con una ruota, (detta *coronata* per via dei denti intagliati sulla sua superficie cilindrica) la cui rotazione è alternativamente arrestata e avviata da due palette solidali con un'asta (la *verga*), che si affacciano a denti diametralmente opposti. Le due palette giacciono in piani che si intersecano lungo l'asse della verga ma formano un certo angolo, in

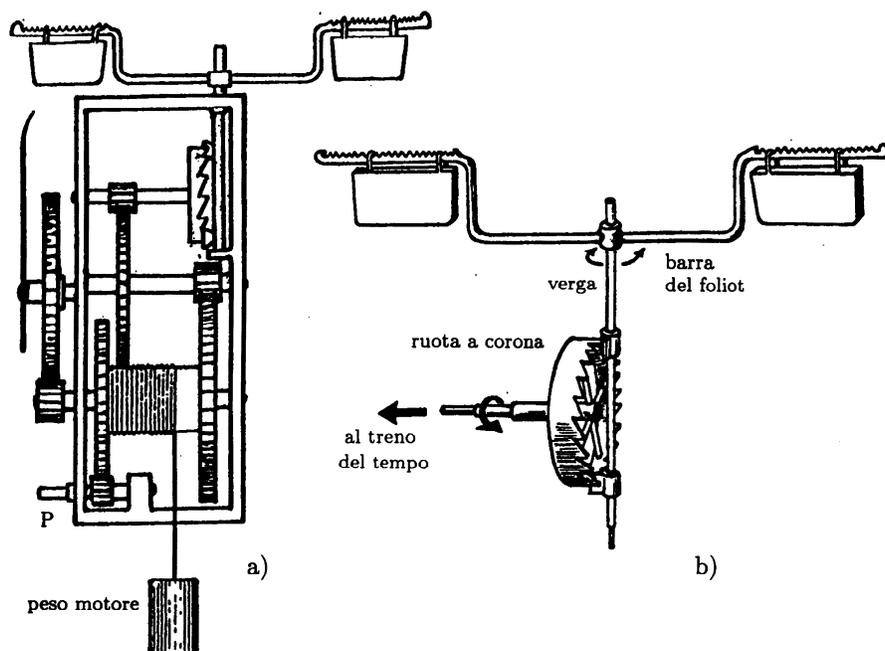


Figura 10: orologio meccanico con scappamento a verga e foliot (tardo Medioevo): a) schema generale; b) particolare del regolatore a verga e foliot.

modo che quando una impegna un dente della corona, l'altra lascia libero quello opposto a cui è affrontata, e viceversa. La verga è collegata a T con una sbarretta alle estremità della quale sono fissati due pesi uguali. La ruota coronata, sotto l'azione del treno, agendo su una delle palette (per esempio su quella inferiore come nel disegno) imprime alla verga e alla sbarretta un impulso che avvia una rotazione. Tale rotazione, però, mentre disimpegna il "dente motore" porta l'altra palette a impegnare il dente opposto, arrestando per un attimo la ruota coronata. Questa agisce ora sulla palette superiore imprimendo alla verga una rotazione opposta alla precedente. Il processo si ripete dando luogo a una sequenza di rotazioni accelerate e subito interrotte e invertite che fanno continuamente ruotare la sbarretta in un senso e in senso opposto. Questo moto ha meritato alla sbarretta il nome di *foliot* (derivato dal francese *folier, faire le fou*: folleggiare e, per estensione, andare da una parte e dall'altra come un folle).

Verga e foliot lasciano dunque “scappare” a intermittenza la corona (e con questa il treno del tempo) e costituiscono il regolatore del moto di caduta del grave appeso al tamburo motore. Questo dispositivo che impone al grave di ricominciare la caduta ad ogni battito (vera novità dell’orologio meccanico) prese il nome di scappamento a verga e foliot. Il foliot è un regolatore inerziale: se si spostano lungo di esso i due pesi, si cambia il momento d’inerzia e con esso la frequenza del battito; tale frequenza è l’inverso del tempo proprio dell’orologio. Oltre che dal momento d’inerzia del foliot, la frequenza dipende anche dall’angolo formato dalle due palette solidali con la verga, dalle dimensioni dei denti della ruota - corona, dal diametro di quest’ultima e, infine, dal peso del grave che, attraverso il treno, trasmette la forza impulsiva che ogni dente della corona esercita sulla paletta della verga.

Nella versione segnatempo, dalla rotazione del tamburo su cui si avvolge la fune che regge il peso motore viene derivato il moto rotatorio dell’asta indicatrice del tempo, che si sposta sul quadrante secondo gli impercettibili passi consentiti dal battito del foliot e dalla riduzione dei rotismi. Previo un momentaneo sganciamento del treno e dell’asta del quadrante dal tamburo del peso, una manovella (collegabile al perno P dell’esemplare di Figura 10) consentiva di riavvolgere la fune e “ricaricare” (di energia gravitazionale) l’orologio.

La versione a suoneria probabilmente portava, al posto del foliot, un martelletto o un battacchio, tenuti, come il foliot, in moto incessante dalla corona e dalla verga. Il rotismo che nell’orologio muove l’asta del quadrante portava una campana fino a fronteggiare il martelletto e ad essere da questo percossa.¹⁹

Quando la tecnica costruttiva dell’orologio meccanico fu ben assestata, questo congegno non si limitò a gestire il tempo della preghiera dentro il monastero ma estese il suo influsso alle adiacenze rurali (spesso molto vaste) sulle quali il monastero irradiava la sua influenza economica oltre che spirituale. Così, come unico era lo spazio monastico e del territorio associato al monastero, c’era un solo tempo, quello del gruppo e della comunità: il tempo per il riposo, per il lavoro, per la meditazione, . . . : un tempo scandito dal suono delle campane, misurato e indicato dal sagrestano che era anche il custode dell’orologio.

3.4 Orologi su torri e campanili

Per tutto il XII secolo il clero monastico costituì probabilmente il mercato più importante per gli orologi meccanici e lo stimolo principale al loro progresso tecnico. Con l'avvento del secolo successivo, però, richieste sempre più frequenti del nuovo congegno vengono dalle numerose corti (reali, principesche, ducali, episcopali) distribuite in tutta Europa e, inoltre, dai grandi centri urbani, con le loro borghesie attive, ambiziose e protagoniste di uno sviluppo estremamente rapido. Soprattutto la borghesia ebbe un influsso decisivo sul destino della giovane industria dell'orologio meccanico. Beneficiaria (alla pari con la Corona) dell'espansione agricola e commerciale che si verifica dal secolo XI al XIV, la città gioca, infatti, un ruolo primario nella storia economica e politica dell'Europa.

Conquistata una sostanziale autonomia dai poteri centrali soprattutto grazie a proprie risorse fiscali, le varie municipalità diventano l'espressione dell'intraprendenza mercantile, finanziaria, artigiana della borghesia. E' il periodo in cui semplici villaggi fino allora assopiti si trasformano in mercati formicolanti delle attività più varie; centri amministrativi e punti di trasbordo e scambio delle merci diventano nodi di traffico per la vendita all'ingrosso, per il commercio al minuto e per l'industria artigiana. Il secolo XI vede sorgere le prime grandi cattedrali, cui altre seguiranno per tre secoli, orgoglio e specchio dell'universo urbano che le esprime. Quando comparvero sulla scena gli orologi meccanici si attivò una autentica gara tra le varie città per dotarsene e impiegarli come accessori delle cattedrali o, in loro sostituzione, simboli della nuova dignità e del nuovo potere secolare.

Così, gli orologi meccanici incominciano ad essere installati su torri, campanili, palazzi. Per citare alcune tra le prime notizie al proposito, possiamo ricordare un documento londinese del 1286 che nomina un *orologiaio* che si prenda cura di un meccanismo a ruota nella cattedrale; del 1314 è l'installazione di un orologio su una torre del ponte di Caen in Francia, del 1340 è un orologio da torre del chiostro di Cluny, del 1344 è un famoso orologio costruito in Padova da Giacomo Dondi (di cui riparleremo tra breve), ecc.

Ma l'orologio svolge anche una funzione pratica essenziale per la città: proprio come il monastero e le sue adiacenze rurali, anche la città aveva bisogno di misurare il tempo. La giornata del cittadino, infatti

(contrariamente a quella del contadino, cadenzata dalla sequenza naturale di compiti legati al lavoro dei campi) era caratterizzata da un ritmo “artificiale” imposto da occupazioni non inserite in sequenze prestabilite. La stessa compattezza spaziale della città consentiva di assumere impegni in serie: con una accurata programmazione (ovvero pianificando il proprio tempo) una persona poteva “moltiplicarsi”. Questo, riguardo al tempo dei mercanti. Ma una suddivisione accurata del tempo era importante anche per la componente artigianale delle attività urbane, specialmente dove si era stabilita l’industria tessile, la prima e più importante delle industrie medievali, condotta fin dai suoi primi sviluppi con criteri di redditività mirati a una produzione su vasta scala in vista delle esportazioni.

Per questi ed altri motivi si diffuse la pratica di scandire il tempo urbano mediante campane, distinte per altezza sonora e fraseggio di note. Prima dell’orologio meccanico il tempo era dato ai campanari da orologi ad acqua e, in una prima fase del loro impiego, anche gli orologi meccanici furono usati semplicemente secondo questa ottica, cioè come segnatempo ai campanari. Successivamente, macchine più grandi e robuste furono dotate di comandi alla soneria delle campane (che rimanevano, però, l’unico veicolo delle informazioni temporali diffuse sulla città). Solo verso la fine del ’200, installati gli orologi alle sommità di torri e campanili, comparvero anche i quadranti esterni con le indicazioni delle ore disposte in cerchio e un’asta che le indicava. E’ di questo periodo anche l’abbandono delle ore canoniche (ineguali) e l’adozione delle 24 ore uguali.

3.5 Gli orologi astronomici da torre

La possibilità offerta dall’orologio meccanico di regolare il moto di un treno di ingranaggi in modo da realizzare rotazioni con velocità media costante interessò ben presto molti astronomi fino a sollecitarli a interagire direttamente con i costruttori o a progettare e costruire essi stessi congegni. Questo interesse si focalizzò da un lato sul perfezionamento del regolatore, in modo da migliorare regolarità e precisione dell’orologio (la precisione degli ordinari orologi, in effetti, lasciava molto a desiderare per i nostri standard odierni: erano consueti scarti giornalieri anche di decine di minuti, che imponevano frequenti ricalibrature mediante meridiane). Dall’altro lato, il sistema di rotismi del treno del tempo

venne arricchito di ingranaggi destinati a riprodurre i moti dei principali corpi celesti, cioè Sole, Luna, stelle fisse. Questo secondo aspetto venne sviluppato in particolare (o comunque è quello di cui è rimasta documentazione) ed ebbe spettacolari conseguenze nel settore degli orologi pubblici.

Come riflesso dell'importanza che l'astronomia assume nel quadro culturale di questo particolare periodo della storia europea, infatti, nel periodo che va dal XIV al XVI secolo si diffonde in tutta l'Europa la costruzione di orologi astronomici da torre e da palazzo.

Si tratta, in generale, di opere con quadranti di aspetto e dimensioni monumentali, inseriti in un apparato decorativo spesso fastoso che impone ai costruttori la necessità di correlarsi con l'architettura dell'edificio che li ospita e che, in molti casi, fa dell'orologio stesso un esempio di architettura nell'architettura e, ancor oggi, un elemento essenziale del valore estetico di torri, palazzi, piazze.

Il più antico di tali orologi è già stato ricordato: venne costruito in Padova nel 1344 per la torre del Palazzo del Capitano su progetto di Jacopo Dondi, professore di medicina e astronomo, ma anche alchimista e studioso di astrologia, cioè un tipico rappresentante di quella folta schiera di scienziati - umanisti dai poliedrici interessi che nelle città europee prepararono la transizione dal Medioevo al Rinascimento.

Dopo l'orologio trecentesco di Padova (che, per altro, distrutto nel 1390 durante un assedio della città, venne ricostruito nel 1430), gli orologi astronomici monumentali si moltiplicarono in Europa, particolarmente in Germania, in Francia, in Svezia, in Boemia e in Italia. Questi orologi, per lo più realizzati tra la fine del '400 e l'inizio del '600, erano tenuti in moto da macchine di dimensioni adeguate ai grandi meccanismi che esse comandavano; l'energia motrice era fornita dal peso di grandi masse sospese e, come regolatori, venivano utilizzati volani o verghe - foliot con scappamento a corona come per gli ordinari orologi da torre. Assai più impegnativi dal punto di vista tecnico e progettuale erano i congegni di trasmissione alle aste dei quadranti, a causa della maggiore complessità delle indicazioni che dovevano essere fornite da questo tipo di orologi. La loro qualificazione di "astronomici", infatti, viene dal fatto che questi orologi, oltre a indicare le ore della giornata, forniscono una straordinaria quantità di informazioni di tipo astronomico: in pratica, spesso, tutto quanto era noto agli studiosi sugli aspetti del cielo in

relazione ai vari periodi dell'anno.

Per questo, i quadranti (sotto forma di planisferi a molte fasce concentriche) riportano le posizioni del Sole e della Luna nei vari mesi e lungo lo zodiaco insieme (quasi sempre) a indicazioni per prevedere le eclissi. Della Luna sono mostrate anche le fasi, mediante la riproduzione dell'aspetto variabile dell'astro stesso.

Le informazioni sono minuziose: nei grandi esemplari tipici vengono indicati i 360 gradi della corona zodiacale (per lo più suddivisa in spazi di 30 gradi, uno per ogni "segno"), la numerazione dei giorni per decadi, i segni zodiacali (con l'indicazione della tipologia astrologica: maschili o femminili, mobili, fissi o comuni, di fuoco, di terra, d'acqua o di aria), le costellazioni della fascia zodiacale con l'esplicitazione delle stelle principali. I quadranti più completi portano anche sofisticati normogrammi da cui è possibile ricavare l'altezza del Sole al meridiano e la durata del dì e della notte.

Una "summa", quindi, di informazioni miste di astronomia e di astrologia, discipline profondamente intrecciate non solo nella cultura dei ceti urbani cui l'orologio era rivolto, ma anche presso i costruttori - progettisti che, a giudicare dalla precisione e dall'esattezza dei risultati, dovevano essere molto vicini al mondo degli astronomi veri e propri.²⁰

Questa fusione dei due modi di guardare agli aspetti del cielo, che soltanto sul finire del '600 si diversificheranno in una disciplina astronomica distinta (almeno nei suoi quadri concettuali) dalle discipline astrologiche, non impedisce tuttavia che i dati strettamente astronomici forniti dagli orologi del '400 e del '500 siano straordinariamente coerenti con le osservazioni del cielo e con i modelli che le interpretavano. Le inevitabili discrepanze dovute all'accumularsi di errori (conseguenti essenzialmente ai metodi impiegati per regolare gli scappamenti delle macchine e alla tecnologia utilizzata nella costruzione dei ruotismi e degli altri meccanismi) erano scrupolosamente corrette a intervalli regolari di tempo ad opera di curatori o "moderatori", previsti - come già per gli ordinari orologi da torre medioevali - dagli statuti comunali delle città e di cui ogni grande orologio era "dotato". Progetto e manutenzione assicuravano dunque precisione e accuratezza veramente notevoli. Così, per esempio, a testimonianza della correttezza scientifica dei progettisti, sui planisferi di questi orologi costellazioni e segni zodiacali generalmente non coincidevano; allo stesso modo, prima che si diffondesse l'uso del calendario

gregoriano (la riforma è del 1582) e venissero modificati di conseguenza i rapporti di trasmissione dalle macchine al planisfero, l'esatta indicazione degli equinozi era uno degli obiettivi primari dei regolatori e tutta una categoria di quadranti prevede che la fascia dell'eclittica possa ruotare per facilitare la correzione. Il moto delle aste relativo ai vari astri era ottenuto mediante riduttori a vite senza fine e ruotismi a ingranaggi nei quali, con un lavoro paziente e accuratissimo, era intagliato un numero di denti scrupolosamente calcolato per realizzare l'esatto rapporto tra i periodi di rotazione desunti dalle osservazioni astronomiche.

L'insieme di questi rotismi costituiva la cosiddetta "macchina astronomica" messa in moto dalla "macchina oraria" (o "del tempo", comprendente il rullo di avvolgimento dei canapi di sospensione dei pesi motori, il regolatore e lo scappamento) che azionava anche la "macchina della suoneria" (o delle campane).²¹

Quadranti con un maggior numero di informazioni necessitavano di macchine astronomiche più complesse. A titolo di esempio, ricordiamo il grande orologio astronomico installato nel 1583 sul Torrizzo di Cremona. La Figura 11 mostra una riproduzione del planisfero originale del grande quadrante (8 metri di diametro) oggi rifatto in forma un po' semplificata. Un restauro della macchina operato negli anni '70 ha riportato l'orologio a funzionare perfettamente.²²

Simili a quello di Cremona sono i bellissimi orologi di Piazza della Loggia a Brescia e di Piazza delle Erbe a Mantova. Quest'ultimo in particolare, porta tutte le indicazioni del quadrante cremonese e, in più (sia pure mediante grafici di non facile interpretazione per chi non è addentro nella materia) segnala l'ora della levata e del tramonto del Sole, l'altezza dell'astro al meridiano e altre informazioni sull'aspetto del cielo.

Sulla scorta della meraviglia che simili opere ancora oggi sollecitano in noi, possiamo ben immaginare l'ammirato stupore che dovevano suscitare ai tempi della loro costruzione: stupore che doveva certamente mescolarsi anche a una sorta di timorosa soggezione per la scienza che esprimevano e a una incondizionata fiducia nella "verità" dei loro messaggi. Fra questi, in particolare, l'immagine stessa della fase lunare che nel pieno fulgore del giorno anticipava fedelmente la forma che l'astro notturno avrebbe avuto nel suo lento trascorrere per il cielo stellato, proprio per la sua intrinseca forza poetica doveva giocare un ruolo deci-



Figura 11: planisfero originale dell'orologio installato sul Torrizzo di Cremona nel 1583.

sivo nel convincere che anche gli altri segni, pur se oscuri o addirittura indecifrabili, preludevano a un destino certo degli astri e degli uomini. Così, come le complesse sfere armillari (che pure si diffondono nel corso dei secoli XV e XVI anche al di fuori della cerchia degli studiosi) sono una rappresentazione degli aspetti geometrici del cosmo, l'orologio astronomico assume la funzione più sottilmente metafisica di simbolo del cosmo nel suo divenire temporale. Per altro verso, al di là della reale capacità di interpretarne i segni, l'uomo medio che abita nella città rinascimentale e la folla del contado che ne varca le porte nei giorni di festa e di mercato vedono nell'orologio astronomico una fascinosa metafora del proprio destino, avvertito come intimamente legato alle "sorti" e agli aspetti ordinatamente, ma misteriosamente mutevoli degli astri.

Ed è seguendo questa direzione emotiva che, fin dai primi del '400 e per i due secoli successivi che vedono il loro fiorire, gli orologi astronomici

(e i comuni orologi da torre) si arricchiranno di elementi esterni al semplice computo del tempo e perfino ai loro significati astrologici. Le prime manifestazioni in tal senso costituiscono uno sviluppo dell'apparato monumentale nel quale il quadrante vero e proprio era inserito.

Tra gli elementi decorativi si svilupperanno fino ad emergere con una loro autonomia visiva e funzionale una o due figure umane "adibite" a suonare le ore. Ricordiamo quello che forse è l'esempio più famoso, la coppia di "mori" posti alla sommità del bellissimo orologio astronomico di Piazza San Marco a Venezia.²³

L'emozione che viene dall'aspetto lievemente sinistro di ogni automa si stempera alla luce del cielo veneziano, ed è appena percettibile dentro la breve meraviglia di fronte a questo grazioso giuoco che associa i movimenti con i suoni.

Di ben più gravi significati si doveva caricare nel passato questo "giuoco" nei paesi dell'Europa centrale, dove i monumentali orologi si corredano di veri e propri caroselli di figure simboliche (il cavaliere, il soldato, il monaco, la morte, l'angelo ...) che, allo scoccare delle ore, sfilano davanti allo spettatore (come nel grande orologio installato all'interno della cattedrale di Strasburgo: Figura 12) o si affacciano ad apposite finestre come attori di una rappresentazione carica di messaggi e di allusioni.

L'orologio diviene quindi un simbolo non più solo di un comune destino del cosmo e dell'uomo ma anche un monito alla dimensione morale ed escatologica del destino umano e cosmico.²⁴

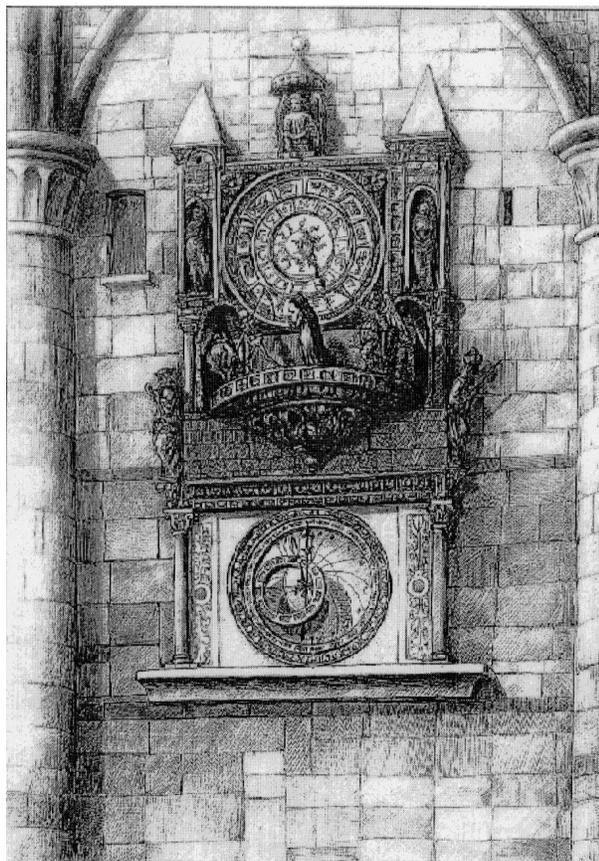


Figura 12: gli orologi astronomici di Strasburgo (ricostruzione a memoria).

3.6 Gli astrarii

A partire dagli anni a cavallo tra '300 e '400, in parallelo al diffondersi degli orologi astronomici da torre, vengono costruiti in Italia complessi meccanismi, chiamati astrarii o planetarii, che descrivono il moto dei cinque pianeti allora conosciuti (Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno) insieme a quello del Sole e della Luna.

Si tratta di orologi in senso lato in quanto la loro struttura richiama quella degli orologi astronomici: una macchina oraria (l'orologio vero e proprio) guida il moto di una macchina astronomica e comanda una macchina della soneria. La macchina astronomica di un astrario, però,

è molto più complessa di quella di un orologio da torre. Ciascuno su un suo quadrante, i pianeti sono rappresentati nei loro movimenti sulla fascia dello zodiaco e sullo sfondo delle stelle fisse sul quale si muove anche l'immagine del Sole. Ciò implica che dalla macchina oraria prendano il moto sei oppure sette macchine astronomiche particolari. Inoltre, poiché il moto dei pianeti è assai più complesso di quello del Sole e della Luna, gli ordinari ruotismi adatti a muovere i planisferi degli orologi da torre non sono sufficienti ma devono essere corredati da meccanismi più sofisticati quali eccentrici, leve snodate e ingranaggi ellittici per realizzare sia il moto oscillante dei pianeti interni attorno al Sole (Mercurio e Venere), sia il moto dei pianeti esterni, caratterizzato oltre che dalla sistematica deriva rispetto alle stelle fisse, dagli episodi periodici del moto retrogrado. Dal punto di vista delle conoscenze teoriche alle quali il progetto doveva riferirsi, gli astrarii presuppongono quindi da parte dei loro ideatori una completa padronanza dei fatti astronomici, delle relazioni tra i movimenti dei vari corpi celesti e dei cinematismi capaci di concretizzare il modello tolemaico del cosmo allora conosciuto. Dal punto di vista realizzativo, queste macchine astronomiche costituiscono esempi precoci di una tecnologia di precisione che anticipa le realizzazioni degli orologi settecenteschi e delle macchine della rivoluzione industriale.

I progettisti che realizzano questi autentici capolavori di ingegneria e di tecnica sono un gruppo di studiosi ancora più ristretto rispetto ai costruttori di orologi astronomici, nel senso che non tutti i costruttori di orologi hanno avuto le capacità e l'opportunità di dedicarsi alla costruzione di astrarii.

Infatti la realizzazione di simili gioielli era compatibile soltanto con una committenza colta e raffinata e di straordinarie disponibilità economiche. Non è un caso che gli astrarii di cui si hanno notizie dirette o indirette siano sistematicamente associati al nome di qualche principe e della sua corte, che faceva di queste macchine un motivo di meraviglia e di prestigio.

Inoltre (sia pure – forse – per i principi più sensibili e più colti) l'astrario aveva anche un altro significato, più profondo e sottile: se sulla torre rivolta al popolo e alla città, l'orologio monumentale era simbolo della ricchezza del Principe e monito alla comunità sul significato del trascorrere del tempo, all'interno del palazzo – in sale appositamente allestite per la corte o nell'intimità degli studioli impreziositi da altre

opere d'arte e di poesia – l'astrario, con la sua capacità di dettagliare la descrizione del cosmo fino a riprodurre i movimenti dei pianeti (*le stelle erranti!*), era un'immagine concreta dell'armonia del cielo e dei suoi astri e, come tale, uno stimolo a emozionanti riflessioni filosofiche, scientifiche, matematiche.

Tra i più famosi planetari (e forse il primo ad essere realizzato) ricordiamo l'*astrarium* di Pavia costruito per Galeazzo II Visconti, il principe del ducato di Milano che intorno al 1360 fece costruire il Castello di Pavia e vi trasferì la sua residenza.

Il costruttore dell'astrario fu Giovanni Dondi (figlio di quello Jacopo, che abbiamo ricordato come costruttore dell'orologio astronomico di Padova): medico, astronomo e studioso di filosofia e di logica, fu chiamato a Pavia come astrologo e medico alla corte viscontea e vi trasferì la propria residenza.

Il progetto e la realizzazione dell'*astrarium* gli costarono sedici anni di studio e di lavoro: il meccanismo astronomico aveva sette facce di cui sei descrivevano il moto dei pianeti e della Luna e la settima indicava il moto delle stelle fisse e le ventiquattro ore. Il piano superiore, inoltre, ospitava un quadrante con le indicazioni del calendario perpetuo e "finestre" dalle quali era possibile desumere la lunghezza del periodo di luce, l'ora della levata e del tramonto del Sole, il giorno del mese, la "lettera dominicale" (indicante il giorno della settimana) e il calendario delle feste mobili.

Nulla è rimasto di questo capolavoro trecentesco, famoso per più di un secolo ma che andò in rovina con la caduta del Ducato di Milano. Il Dondi, però, lasciò una minuziosa descrizione della propria opera, corredata da disegni costruttivi dei singoli meccanismi e dei quadranti (Figura 13a), che ha permesso in tempi moderni una ricostruzione della macchina astronomica con grande probabilità molto fedele all'originale (Figura 13b).

3.7 La corsa all'orologio portatile

I grandi orologi pubblici hanno lasciato numerose notizie storiche e documentazioni materiali ma certamente accanto ad essi, anche se assai meno documentati, piccoli orologi da camera devono avere avuto una analoga diffusione fin dal tardo Medioevo, essendo, dopotutto, l'orologio meccanico uno sviluppo del meccanismo a soneria, il quale era costruito

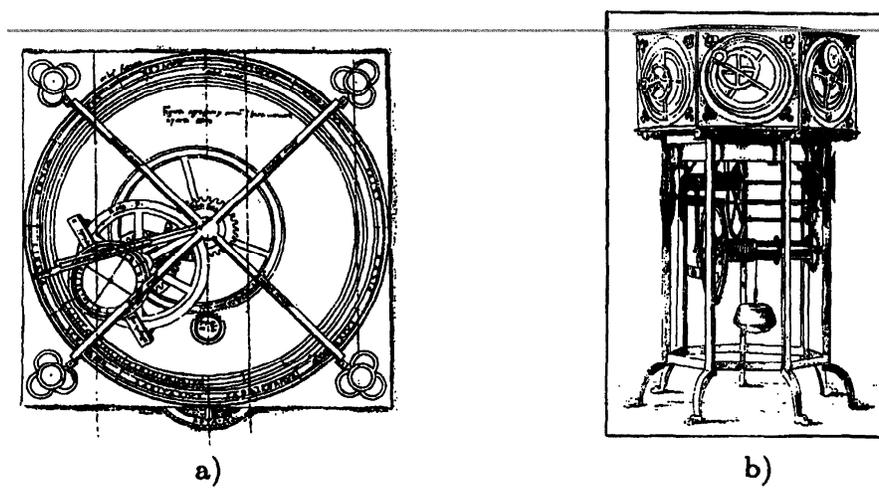


Figura 13: a) Il quadrante di Mercurio dell'astrario di Pavia in un disegno di Giovanni Dondi (fine del Trecento); b) L'astrario del Dondi ricostruito alla Smithsonian Institution di Washington.

a misura domestica.

Per soddisfare soprattutto la richiesta di tali orologi da camera, fin dalla metà del '400 in vari centri della Francia, dell'Inghilterra e dell'Europa centrale si erano costituite comunità di artigiani dediti esclusivamente alla professione di orologiai. Lo sviluppo di questa nuova professione costituì un fattore di riduzione dei costi di produzione, dunque una spinta verso l'allargamento della domanda: gli orologi da camera cessarono di essere suppellettili esclusive delle dimore principesche ma poterono figurare come un elemento caratteristico dell'arredamento di ogni casa semplicemente benestante.

La nuova professione costituì anche un terreno fertile per il miglioramento qualitativo del nuovo congegno. Infatti la realizzazione degli orologi da camera impose agli artigiani l'adozione di metodi di lavorazione più precisi: per esempio, le ruote dentate dovevano essere fatte meglio che per le grandi macchine da torre, realizzate in ottone (metallo assai più omogeneo e lavorabile del ferro e più adatto a manufatti di piccole dimensioni).²⁵ Realizzare buone rifiniture di precisione negli

strumenti di piccole dimensioni era assai più importante che nei grandi meccanismi. (L'irregolarità di una ruota piccola si traduce in un errore maggiore sul quadrante).

La miniaturizzazione di precisione era necessaria anche per un altro motivo. Negli svegliaorologi monastici l'energia per il movimento, come abbiamo visto, era fornita da un grave appeso a una fune che si avvolgeva su un tamburo solidale con il treno del tempo; le dimensioni relativamente piccole degli strumenti imponevano una discesa limitata del grave e quindi la necessità di frequenti ricariche. Ciò, però, non era un serio inconveniente, dato l'uso più da *timers* che da orologi veri e propri cui erano destinati questi congegni. Nelle grandi macchine poste alla sommità delle torri il vincolo di una ricarica frequente era evitato grazie alla possibilità di lunghe corse di discesa dei pesi motori nel corpo stesso della torre o del campanile; inoltre, se anche le ruote erano intagliate con lavorazioni grossolane, si ovviava alla presenza degli attriti mediante pesi notevoli (fino a 500 chili!). Per il mercato degli orologi da camera del '400 e del '500, però, né una frequente ricarica né grossi pesi con lunga corsa di discesa erano ormai accettabili; era necessario adottare un motore interno al posto dei pesi. Questo motore fu una molla costituita da una lunga lamina elastica avvolta a spirale (vedi la Figura 14). Le prime soluzioni di questo tipo datano all'inizio del '400 ma la loro diffusione si realizzò solo nel secolo successivo quando furono avviate soluzioni a due problemi sollevati dal nuovo congegno motore. Innanzitutto era difficile fabbricare molle perfettamente funzionanti e che non avessero vita troppo corta (a causa della diffusa incapacità a trattare adeguatamente l'acciaio); in secondo luogo, mentre i pesi impartivano una spinta costante per tutto il corso della caduta, la forza della molla diminuiva a mano a mano che la molla si svolgeva e ciò provocava una diminuzione della frequenza di oscillazione del foliot e dunque una diminuzione della velocità di marcia. Era necessario regolarizzare nel tempo l'erogazione di energia. Il primo problema trovò una soluzione nel corso del XV secolo grazie alla evoluzione della metallurgia dell'acciaio sollecitata da esigenze esterne al mondo dell'orologeria (artigianato delle armi, costruzioni di telai tessili, ecc.): gli orologiai poterono così approvvigionarsi di molle efficienti e durature presso artigiani esperti del trattamento dell'acciaio.

Per una erogazione costante di energia si ricorse a diversi metodi, di cui

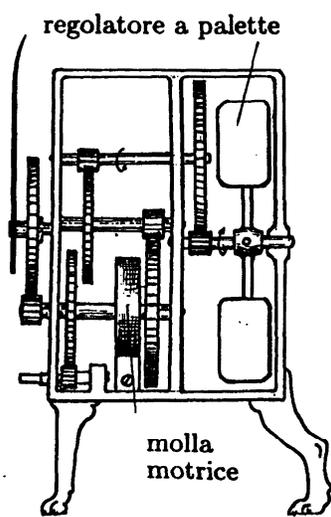


Figura 14: orologio da camera quattrocentesco con dispositivo motore a molla: il regolatore è qui costituito da palette tenute in rapida rotazione e frenate dall'aria. Questo sistema di regolazione dava luogo a notevoli irregolarità di funzionamento, soprattutto per la dipendenza della resistenza dell'aria dalla temperatura.

i più usati saranno il fuso (o *conoide*) e il freno.

Il fuso era una ruota intermediaria tra la molla motrice e il treno, che la molla faceva girare per mezzo di una sottile catenina (vedi la Figura 15). Il fuso aveva la forma di un tronco di cono ed era orientato in modo tale che quando la molla, subito dopo la carica, era tesa al massimo, la catenella trainasse il fuso agendo sul suo diametro minore; quando, nel corso del funzionamento, la molla si rilassava (diminuendo d'intensità la forza motrice) la catenella agiva su diametri via via più grandi: in questo modo l'aumento del braccio compensava la diminuzione della forza, mantenendo costante il momento motore agente sul treno.

L'altro metodo per regolarizzare l'azione della molla motrice consisteva nel frenare la rotazione della botticella mediante una camme pilotata dal moto del treno del tempo e profilata in modo tale da ridurre l'azione frenante mano a mano che la molla si svolgeva.

L'introduzione della molla motrice con compensazione rese possibile il vero e proprio orologio mobile di tipo domestico e successivamente,

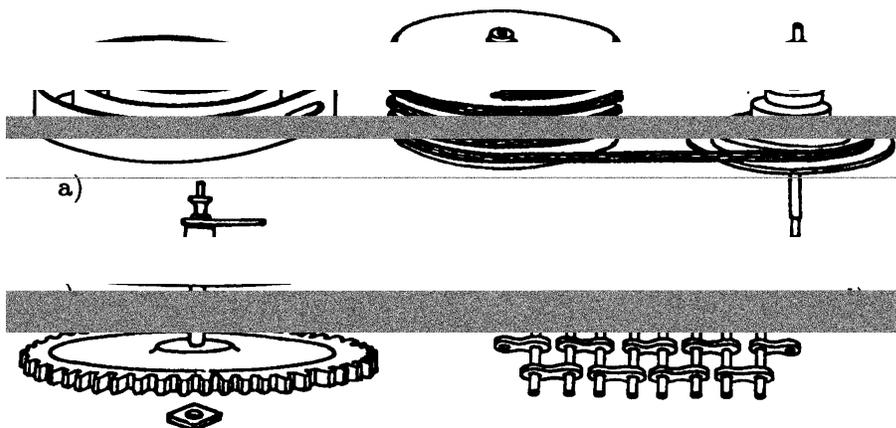


Figura 15: molla motrice e compensazione a fuso: a) Molla a lamina spirale. All'estremità si nota l'asola che consente di fissare la molla alla parete della botticella. L'estremità al centro della spirale è fissata al telaio dell'orologio. b) Botticella e fuso collegati dalla catenella di traino. Nella botticella è contenuta la molla; la catenella si avvolge sulla botticella a partire da una estremità mentre l'altra estremità si avvolge su una pista a elica conica praticata sul fuso. Il fuso è poi calettato sulla prima ruota dentata del treno del tempo (vedi particolare c). d) Particolari della catenella.

mediante processi di miniaturizzazione, l'orologio portatile (equivalente all'attuale orologio da taschino e da polso).²⁶ Dal momento che la lavorazione in miniatura è la prima scuola di abilità artigiana, il piccolo orologio portatile (da camera o da tasca) si dimostrò uno strumento per molti aspetti rivoluzionario. I costruttori di orologi piccoli andarono via via differenziandosi dai fabbri e fonditori di cannoni che erano adibiti alla costruzione dei grandi orologi pubblici.²⁷ Si formò così una elite di artigiani, selezionata da un mercato sempre più ampio ed esigente.

Per la società e per la cultura le conseguenze della miniaturizzazione si rivelarono ancora più profonde. L'orologio portatile, consentendo di "avere" il tempo in casa o sulla persona, cioè di privatizzarlo e personalizzarlo, fu tra i maggiori stimoli al sorgere dell'individualismo, uno degli aspetti più caratteristici della moderna civiltà occidentale. L'orologio portatile sollecitò anche la crescita di una nuova sensibilità rispetto al tempo, che si sviluppò in diverse direzioni. Come già all'interno dei mo-

nasteri (ma, ora, non più sotto l'aspetto collettivo ma sul piano di una responsabilità personale e di una sorte individuale) il tempo "privato" fu considerato da una componente mistico - religiosa della società quattro - cinquecentesca come qualcosa di sacro, un tempo da "risparmiare" per il giudizio finale, un tempo che, se "bene speso" (cioè distolto dalla caccia ai beni materiali, alle frivolezze e ai piaceri) è il vero segreto della salvezza. Ma anche da posizioni laiche il tempo era considerato come un bene personale da non sciupare. Leon Battista Alberti, ad esempio, scriveva (1433) "Prima voglio perdere il sonno che il tempo, cioè la stagione delle faccende". (L'indomani sarebbe stato possibile recuperare il sonno, il cibo e cose del genere, ma non gli affari).

Questa concezione "mercantile" del tempo si diffuse specialmente nelle regioni d'oltralpe dopo la Riforma, in concordanza con lo spostamento dal sud al nord dell'Europa del cuore delle attività commerciali e industriali che caratterizza il Cinque e il Seicento.

La diffusione dell'orologio rese possibile (e a sua volta ne fu stimolata) la riorganizzazione di quelle attività che dipendono da arrivi e partenze o che si configurano come eventi simultanei e collettivi, cioè, principalmente, i trasporti, le comunicazioni e la guerra. Datano dalla fine del '400 le definizioni di orari fissi per la partenza di merci, passeggeri, servizi di posta interurbani tra centri via via più numerosi. Data la lentezza dei viaggi (per coprire 50 chilometri era normale impiegare un giorno) non c'era la necessità di correggere l'indicazione del proprio orologio per adeguarla a quella degli orologi della città in cui si arrivava; esisteva invece il problema di un diverso modo di conteggiare le ore. Paesi diversi cominciavano la loro giornata a ore diverse, chi all'alba, chi al tramonto, chi a mezzogiorno, ecc. Col tempo, le esigenze del traffico internazionale divennero tali da indurre una decisa semplificazione e l'uso comune si assestò gradualmente sul modello attuale: mezzanotte come punto di partenza e poi 12 ore antimeridiane e 12 ore postmeridiane.²⁸

Anche se, in teoria, nessun'altra attività come lo spostamento di truppe avrebbe avuto bisogno di un tempo rilevabile, l'uso dell'orologio nelle tattiche militari si fece strada lentamente. Ciò, probabilmente, fu dovuto al fatto che i segnatempo portatili erano troppo approssimativi per consentire la coordinazione di masse di soldati sul campo di battaglia e, d'altra parte, gli errori eventuali sarebbero stati particolarmente rischiosi. Solo alla fine del Settecento gli orologi da tasca saranno suffi-

cientemente precisi da essere realmente utili nella guerra ed entreranno perciò come parte integrante dell'equipaggiamento standard di qualunque capitano dell'esercito o ufficiale di marina.

3.8 La ricerca della precisione

Con gli inizi del Seicento si apre una nuova era nella storia della cronometria. La diffusione degli orologi, infatti, diede luogo a una ramificazione nell'industria che li produceva che poté specializzarsi nella diffusione di modelli corrispondenti a diverse esigenze pratiche e di gusto.

Questo fatto consentì, accanto al mantenimento del normale mercato, l'evoluzione di linee di sviluppo. Tra le più importanti, la ricerca di ulteriori miniaturizzazioni mirate a riprodurre nella piccola scala degli orologi da camera i meccanismi ad alta complessità degli astrarii e degli orologi astronomici da torre, produsse veri capolavori di finezza esecutiva destinati a una élite di facoltosi borghesi o di principi le cui dimore incominciarono a popolarsi di modellini astronomici, carillons, manichini automatici e altre bizzarrie. Un'altra tendenza spinse al massimo grado l'attenzione alla veste esterna dell'orologio da camera o da tasca; il primo divenne sempre più un soprammobile la cui funzione decorativa e di *status symbol* sopravanzava di gran lunga la qualità delle prestazioni cronometriche. L'orologio da tasca, da parte sua, divenne sempre più un monile portatile, con funzioni simili a quelle dei gioielli. In questi campi si produssero veri capolavori quanto a bellezza, raffinatezza e stile, capostipiti di una lunga serie di orologi fortemente decorativi la cui tradizione è ancora viva ai giorni nostri.

Ma la linea di sviluppo che alla distanza si rivelò come la più importante fu la ricerca della precisione, cioè lo sforzo di fabbricare strumenti sempre più accurati e affidabili.

Questa tendenza (già sollecitata fin dai primi del '500 soprattutto dalla clientela inglese e olandese che operava nel quadro di società eminentemente mercantili) si svilupperà per tutto il Seicento e per quasi tutti i due secoli successivi sotto la spinta di due interessi particolari.

Il primo era quello degli astronomi. Come abbiamo già ricordato, l'astronomia si era interessata all'orologio meccanico fin dal Medioevo ma più per le possibilità offerte dai congegni a ruote di *riprodurre* moti dei corpi celesti che per utilizzare i veri e propri meccanismi di misura del tempo: la regolazione mediante scappamento a verga e foliot consentiva

precisioni di gran lunga inferiori a quelle consentite (sia pure su tempi dell'ordine del giorno) dalle clessidre e dai più elaborati orologi ad acqua. Tuttavia, tra Quattro e Cinquecento l'orologio meccanico incominciò ad essere considerato un indispensabile strumento per l'osservazione vera e propria.

Per esempio, lo stesso Tycho Brahe, dopo aver utilizzato per decenni orologi ad acqua da lui stesso perfezionati, si risolse a impiegare anche orologi meccanici, dei quali, però, non poté mai dirsi soddisfatto pienamente (tanto che, per le misurazioni più raffinate del tempo intercorrente tra passaggi stellari, tornò a servirsi di alcune versioni della clessidra con impiego di mercurio e di altri liquidi).

Verso la fine del Cinquecento, però, l'orologio meccanico (sia pure nella versione di alcuni esemplari costruiti dal più capace orologiaio del tempo, lo svizzero Jost Bürgi) mostrò la sua straordinaria utilità nel consentire lo sviluppo di un programma sistematico di cartografia celeste sviluppato a Kassel da Guglielmo IV di Hesse e dal suo astronomo Christoph Rothmann.²⁹

Tuttavia, anche la precisione dei capolavori di Bürgi (basati su sofisticate modifiche del regolatore a verga e foliot) era contenuta entro margini di oscillazione non molto inferiori a un minuto al giorno. Poiché la volta celeste ruota di un grado ogni 4 minuti circa, tali errori sul tempo comportavano possibili errori nella posizione delle stelle dell'ordine di 15 primi d'arco: tali errori (anche se maggiori di quelli dati, nei tempi brevi, dalle clessidre) potevano essere accettati da una astronomia che si basava ancora sulle osservazioni a occhio nudo, ma non sarebbero più stati compatibili con le osservazioni che, dopo l'esempio di Galileo (1607), gli astronomi incominciarono a fare al telescopio. (Non dimentichiamo, per di più, che ben pochi astronomi avrebbero potuto usufruire di orologi di qualità paragonabili a quelli di Bürgi).

La precisione e la cura poste nella lavorazione degli ingranaggi (e dei sistemi di compensazione delle molle nei vari casi in cui queste venivano impiegate al posto dei pesi) erano tali da escludere che l'imprecisione dipendesse dal treno del tempo: la fonte delle irregolarità era nel sistema corona - verga - foliot. Il fatto, poi, che anche le sofisticate varianti di Bürgi e di altri non avessero rimosso sostanzialmente tale irregolarità, indicava che era necessario adottare un metodo di regolazione diverso.

La seconda importante esigenza di precisione (sostanzialmente iden-

tica a quella degli astronomi) venne dalla necessità di calcolare la longitudine, a sua volta resa attuale dai grandi viaggi di scoperta e di conquista che, a partire dalla metà del '400 – dopo la circumnavigazione dell’Africa e la conseguente rotta portoghese verso l’India e dopo la scoperta dell’America e dell’Oceano Pacifico – impegneranno fin oltre il diciottesimo secolo le nazioni europee affacciate all’Atlantico. La corsa all’occupazione degli immensi territori del Nuovo Mondo e, ancor prima, il traffico di ricchezze dai paesi appena scoperti e lungo le nuove rotte marittime (oro e argento dal Messico e dal Perù, spezie, seta, pietre preziose e legni pregiati dall’India e dall’Estremo Oriente) fecero del viaggio oceanico un fattore di vitale importanza per l’economia e la politica delle nazioni d’Europa.

Si trattava, però, di imprese tremendamente rischiose, che imponevano prove durissime a equipaggi e navigli: la traversata del Pacifico (la famosa “rotta delle Filippine” da Manila ad Acapulco in Messico, qualcosa come quindicimila chilometri di distanza) era la peggiore ma le lunghe spedizioni oltre il Capo Horn e il Capo di Buona Speranza non erano molto meglio. La ricchezza (e il potere) di tutte le nazioni marinare, però, risiedeva nella loro capacità di effettuare queste traversate mortali.

Tuttavia, senza la capacità di misurare latitudine e longitudine, non c’era modo di sapere con certezza in quale posizione ci si trovasse né quanto lontano o quanto a lungo ancora si dovesse navigare. Ora, la misura della latitudine poteva essere condotta con esiti abbastanza precisi mediante metodi lungamente sperimentati, quali il rilevamento dell’altezza della Polare (sull’orizzonte settentrionale) o l’utilizzazione di tabelle basate sull’altezza del Sole (che servivano specialmente per navigazioni al disotto dell’equatore). Per la misura della longitudine, invece, i metodi erano drammaticamente imprecisi: per lo più si ricorreva a stime della velocità della nave³⁰ nella direzione del parallelo lungo il quale veniva effettuato l’attraversamento dell’oceano, da utilizzare in correlazione alla lunghezza lineare (la “longitudine” appunto) di un grado del parallelo, calcolato a sua volta sulla base di valutazioni teorico - pratiche delle dimensioni della Terra. Un errore nel calcolo della longitudine poteva voler dire fallire un approdo e dunque giorni, settimane alla deriva nello spazio vuoto dell’oceano, equipaggi distrutti dalle malattie e dalla sete. La leggenda dice di vascelli senza timone che trasportano tesori e

cadaveri verso qualche approdo sconosciuto. (Pensiamo a racconti come quello dell'*Olandese volante*, il vascello fantasma condannato a non fermarsi mai).

Gli effetti negativi dell'ignoranza in materia di longitudine erano moltiplicati dalle conseguenze sulla cartografia. Le mappe, infatti, erano il principale mezzo di trasmissione di informazioni: nella competizione internazionale per l'accesso alle ricchezze delle Indie, le mappe erano carta moneta, pagate a peso d'oro da qualunque nazione. Ma a cattivi sistemi di misurazione corrispondevano mappe infedeli e più di una nave perse giorni preziosi alla ricerca di terre esistenti solo sulla carta.

A fronte di una situazione pratica così difficile, il metodo esatto era, in linea di principio, implicito nell'analogia con il problema della cartografia astronomica di trovare l'ascensione verticale. Anche nel caso della longitudine, un orologio (preciso) avrebbe risolto il problema: poiché la Terra ruota di 15 gradi all'ora, la conoscenza del ritardo (o dell'anticipo) del transito del Sole al meridiano di un luogo rispetto al suo transito al meridiano di un altro luogo avrebbe consentito di valutare la longitudine relativa tra i due luoghi.³¹

Il primo navigatore che misurò la longitudine utilizzando un orologio fu, con ogni probabilità, il fiorentino Giovanni da Verazzano. Certamente fu il primo a scriverne, in una missiva del 1524 indirizzata al re di Francia Francesco I, "committente" di un viaggio di esplorazione delle coste nordamericane, che Verazzano compì dalla Florida fino all'estuario del San Lorenzo.³²

Le misure di Verazzano erano molto imprecise a causa degli orologi che aveva a disposizione: probabilmente clessidre (usate correntemente sulle navi per definire i turni di guardia), forse orologi meccanici resi ancor più imprecisi dalle difficili condizioni in cui dovevano funzionare durante mesi di navigazione.

L'imprecisione degli orologi, in effetti, limitò grandemente il diffondersi di questo metodo, sicché pochi altri navigatori, nel corso del Cinquecento, si provarono a sperimentarlo.

Circa gli inconvenienti cui l'imprecisione dei cronometri poteva dar luogo, basti ricordare che all'equatore 1 grado di longitudine, che comporta 4 minuti di rotazione della Terra, corrisponde a 111 chilometri e quindi orologi che fossero stati imprecisi anche solo per 1 minuto al giorno come gli esemplari di Kassel, nel corso di mesi di navigazione

avrebbero portato a errori di centinaia di chilometri, cioè altrettanto disastrosi di quelli provocati dalle stime della velocità della nave.

Rendere precisi gli orologi era dunque una necessità con vaste implicazioni economiche. Attratti dalla sfida, dal denaro e dalla prospettiva di una fama universale, i più valenti scienziati e i tecnici più esperti dell'Europa secentesca si votarono con tutte le loro forze alla ricerca della soluzione.

Il primo passo verso una rivoluzionaria innovazione del regolatore venne compiuto da Huygens nel 1656. Lavorando in collaborazione con l'orologiaio Salomon Coster ad Amsterdam, Huygens eliminò il foliot e lo sostituì con un pendolo (Figura 16).

Abbondantemente isolato dagli effetti perturbatori del treno, il nuovo regolatore produsse un miglioramento spettacolare: si passò da errori di almeno dieci minuti nell'arco di una giornata (tipici dello scappamento a verga - foliot) a imprecisioni contenute in poche decine di secondi. Inoltre il congegno era di così facile applicazione che non solo si iniziò a costruire orologi con questo tipo di regolatore, ma anche quelli esistenti furono convertiti in massa al nuovo modello. L'invenzione di Huygens suscitò polemiche da parte di molti orologiai ed esperti che ne mettevano in dubbio la paternità (anche per evitare il pagamento di diritti per l'utilizzazione del nuovo regolatore sul quale Huygens aveva ottenuto un brevetto). In Italia, e in particolare a Firenze, si rivendicava a Galileo la priorità dell'impiego di un pendolo per regolare un orologio.

Di fatto, non ci sono prove che lo scienziato pisano abbia realmente sperimentato questo metodo, anche se è molto probabile che ne abbia avuto l'intenzione. Esiste infatti un disegno risalente al 1641 (forse fatto da Vincenzo Galilei per il padre) di un orologio basato su uno scappamento a ruota controllata da un pendolo (vedi la Figura 17).³³ Non senza amarezza per queste polemiche, Huygens poté dimostrare l'autonomia della propria invenzione, alla quale apportò ben presto delle modifiche essendosi reso conto di alcune difficoltà introdotte dall'uso del pendolo, di cui una particolarmente interessante. Tale difficoltà derivava dal fatto che il periodo di un pendolo che compie traiettorie circolari (come accade di un grave appeso a un filo o collegato con un'asta a un perno) cresce al crescere dell'ampiezza di oscillazione: soltanto per piccole ampiezze possiamo considerare il periodo indipendente dall'ampiezza (isocronismo). (Già Galileo si era accorto di questo fatto, attribuendone erroneamente

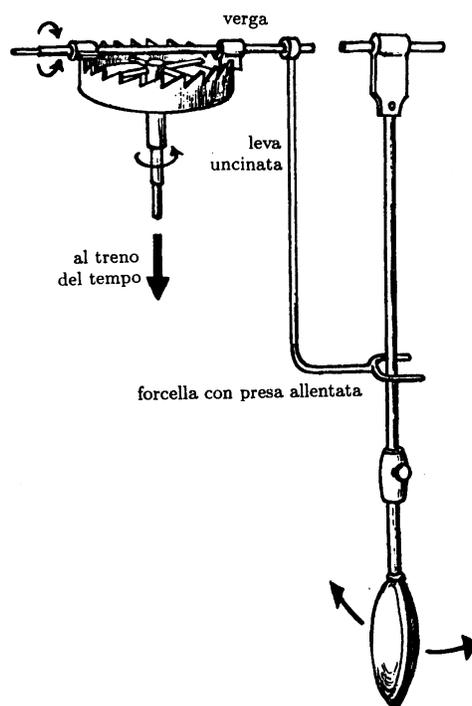
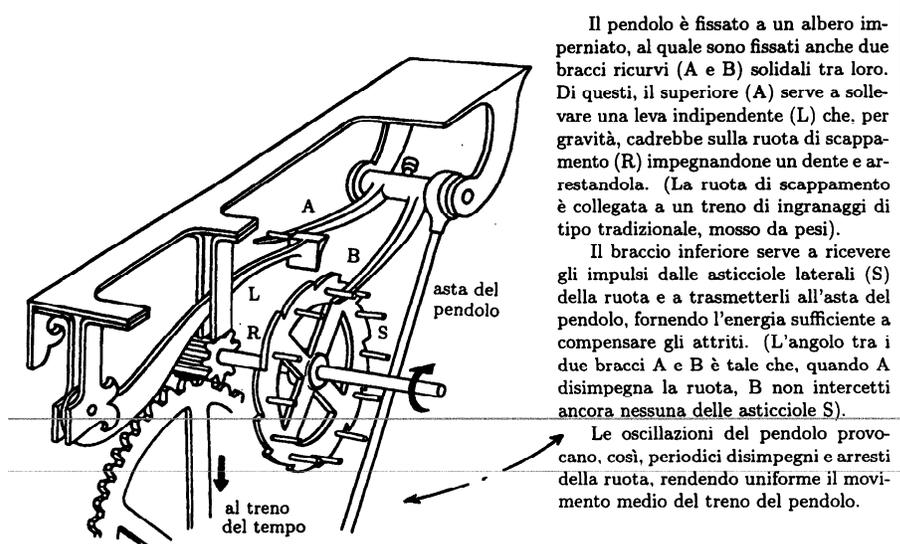


Figura 16: scappamento a verga e pendolo (dall'“Orologium” di Huygens - 1658).

la causa al solo effetto dell'aria). Huygens investigò questo problema riconoscendo che il non isocronismo era dovuto non tanto alla resistenza dell'aria ma a una troppo diversa efficacia della forza peso nelle diverse posizioni del pendolo quando le oscillazioni erano grandi. Questo comportamento era particolarmente importante se, come nel suo orologio, il pendolo sostituiva semplicemente il foliot, continuando a controllare un sistema verga - ruota a corona (vedi la Figura 16) per il cui funzionamento (a causa della necessaria divaricazione delle due levette della verga) era richiesta una oscillazione molto ampia (fino a venti e più gradi).

La soluzione di fabbricare orologi i cui pendoli descrivessero archi uguali si rivelò impraticabile.

Sviluppando l'idea intuitiva di ottenere l'isocronismo aumentando la lunghezza effettiva del pendolo a mano a mano che la massa si muove



Il pendolo è fissato a un albero imperniato, al quale sono fissati anche due bracci ricurvi (A e B) solidali tra loro. Di questi, il superiore (A) serve a sollevare una leva indipendente (L) che, per gravità, cadrebbe sulla ruota di scappamento (R) impegnandone un dente e arrestandola. (La ruota di scappamento è collegata a un treno di ingranaggi di tipo tradizionale, mosso da pesi).

Il braccio inferiore serve a ricevere gli impulsi dalle asticcioline laterali (S) della ruota e a trasmetterli all'asta del pendolo, fornendo l'energia sufficiente a compensare gli attriti. (L'angolo tra i due bracci A e B è tale che, quando A disimpegna la ruota, B non intercetti ancora nessuna delle asticcioline S).

Le oscillazioni del pendolo provocano, così, periodici disimpegni e arresti della ruota, rendendo uniforme il movimento medio del treno del pendolo.

Figura 17: scappamento a ruota per un orologio a pendolo di invenzione galileiana (ricostruzione).

verso la sua posizione più bassa, Huygens compì dapprima delle prove empiriche sospendendo il pendolo a due cordicelle parallele e imponendo che l'oscillazione si svolgesse tra due pareti lungo le quali le cordicelle si adagiavano durante il dondolio (Figura (18)).

Dimostrò poi *more geometrico* (cioè con il calcolo) che le oscillazioni sarebbero state isocrone se la traiettoria del grave fosse stata un arco di cicloide, cosa che si poteva ottenere se i profili delle due guide dei fili fossero stati a loro volta due archi simmetrici di cicloide.³⁴

Huygens fu immensamente fiero di questo risultato (che rese noto nel suo *“Horologium”*, del 1658), come dimostra in una lettera a Pascal, nella quale si dichiara più compiaciuto di aver trovato la tautocronia della cicloide che di aver avuto l'idea di applicare il pendolo alla regolazione dell'orologio.³⁵

All'atto pratico, però, le guide cicloidalì si dimostrarono, col tempo, assai meno utili di quanto Huygens si aspettava, in quanto funzionavano solo se l'orologio era perfettamente fisso e verticale. Ciò escludeva la possibilità di usarle in orologi da tavolo e soprattutto in strumenti

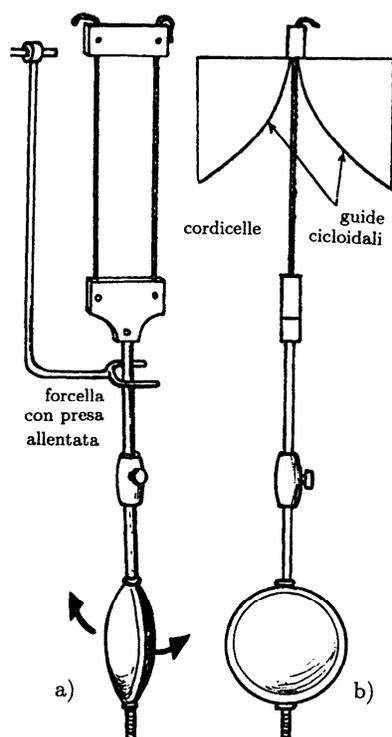


Figura 18: pendolo isocrono di Huygens: a) vista frontale dell'equipaggio oscillante b); vista di profilo dell'equipaggio mobile e delle guide cicloidali.

marini.

Il pendolo a traiettoria cicloidale non ebbe quindi una significativa diffusione. La soluzione all'isocronismo venne da un nuovo tipo di scappamento, lo *scappamento ad ancora* (vedi la Figura 19). In vicinanza del perno di sospensione, l'asta cui è collegata la massa del pendolo porta due bracci (che per la forma danno il nome a questo tipo di scappamento) i quali, mediante due denti, arrestano una ruota solidale con il treno del tempo o le consentono di riavviarsi grazie agli spostamenti che compiono per il fatto di essere solidali con l'oscillazione del pendolo. La verga (con le due palette) e la ruota a corona sono dunque sostituite, con il vantaggio di poter utilizzare oscillazioni molto piccole del pendolo, tali da poter essere considerate isocrone. Inoltre, l'azione motrice del treno

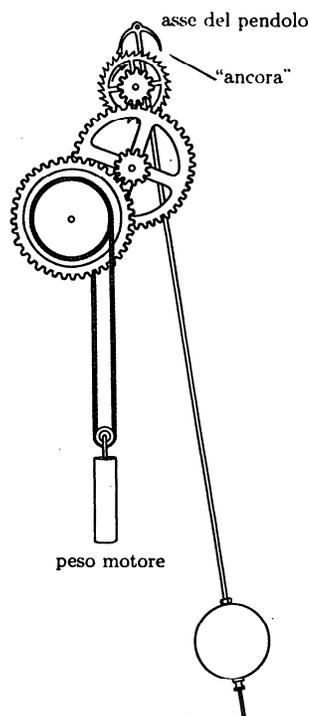


Figura 19: orologio a pendolo con scappamento ad ancora.

sull'ancora stessa (cui si deve la piccola somministrazione di energia al pendolo, capace di bilanciare le perdite per attrito) risulta molto più regolare di quella trasmessa alla verga dalla ruota a corona.

La precisione consentita dal nuovo scappamento ad ancora fece emergere nuove fonti di errore fino ad allora trascurabili. Tra queste ricordiamo in particolare gli effetti della dilatazione termica sulla lunghezza del pendolo e quindi sul periodo. Per rimuovere questa causa di imprecisione non solo si ricorse a tutte le conoscenze di metallurgia allora disponibili ma venne dato un notevole impulso alla ricerca di nuove leghe caratterizzate da piccoli valori della dilatabilità in parallelo a studi su sistemi di compensazione fra metalli diversi. A questi livelli di precisione fu necessario rivedere anche il processo di lavorazione dei rotismi, in particolare dei denti delle ruote. A questo proposito, tutto il problema di trasmettere il moto mediante ruote dentate fu analizzato

da un punto di vista matematico - meccanico e questa indagine portò a riconoscere nei profili coniugati le forme dei denti più adatte a ridurre a valori quasi nulli lo strisciamento (e i conseguenti attrito e usura) nei punti di contatto.

Alla luce di questi risultati vennero inoltre ideate e costruite vere e proprie macchine utensili in grado di tagliare automaticamente denti dai profili corretti, con un evidente vantaggio in precisione e riproducibilità delle ruote (Figura 20). A questi e ad altri studi sull'orologio si dedicò un grande numero di talenti, quale nessun altro argomento aveva messo in moto: Galileo, Pascal, Huygens, Hooke, Leibnitz, Newton dedicarono parte del loro tempo a problemi direttamente o indirettamente collegati alla cronometria. Al loro fianco lavorava un esercito di astronomi le cui osservazioni meticolose fornivano i dati di base per l'analisi sistematica e la previsione dei movimenti dei corpi celesti; né mancarono alcuni dei più creativi matematici dell'epoca (i Bernoulli, La Hire, Desargues, Cartesio) che si dedicarono ai problemi astronomici, meccanici e dell'orologeria come luoghi di sperimentazione dell'efficacia di nuovi campi della matematica e della geometria.

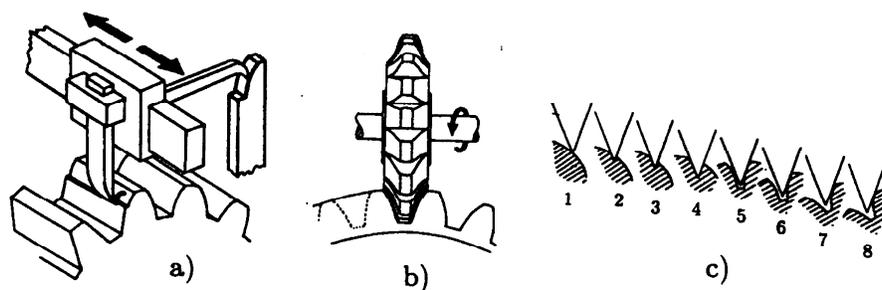


Figura 20: alcuni metodi ideati e messi in atto tra '600 e '700 per realizzare in modo automatico ruote dentate mediante macchine utensili progettate *ad hoc*. In a) i denti vengono intagliati secondo una sagoma che guida l'utensile; in b) una fresa opportunamente profilata asporta il materiale tra due denti contigui; in c) i denti si ottengono per involuppo dei fianchi di una fresa con denti a profilo rettilineo. Quanto al profilo dei denti, l'evolvente di cerchio viene universalmente adottata come ottimale per ridurre al minimo gli attriti, secondo i risultati di studi condotti dai più brillanti matematici del tempo.

Infine, mastri orologiai e semplici fabbricanti meritano di dividere con

gli scienziati il merito di ogni successo della cronometria in un contesto tecnico - scientifico che vedeva sia i più grandi scienziati eseguire materialmente, in proprio, molte operazioni (dalla molatura di lenti all'invenzione e fabbricazione di strumenti) sia i migliori artigiani in possesso di sorprendenti nozioni teoriche e di notevoli capacità logiche.

Gli effetti di questo stato di cose nella cronometria non tardarono a farsi sentire in altri campi della conoscenza.

Gli astronomi, per esempio, misero in luce una irregolarità nel moto diurno del Sole mai osservata prima e che confermava alcune previsioni della meccanica celeste basata sulle leggi di Keplero e descritta dal nuovo metodo di calcolo di Newton.

In effetti, a causa della variazione della velocità della Terra lungo la sua orbita combinata con l'inclinazione dell'asse di rotazione sul piano dell'eclittica, l'intervallo temporale tra due successivi transiti del Sole al meridiano di un luogo subisce delle variazioni nell'arco dell'anno. Tali variazioni (anticipi e ritardi dell'ordine di pochi secondi al giorno) si accumulano dando luogo a una differenza tra il tempo della culminazione del Sole e il mezzogiorno del *tempo medio*, indicato da un orologio che marci con uniformità.³⁶

E' interessante ricordare che quando questa discrepanza uscì dall'ambito dell'astronomia ed entrò nel campo dell'amministrazione civile del tempo, la prima tendenza fu di convertire il tempo dell'orologio al tempo del Sole (così come gli antichi orologi erano registrati sull'ora solare). Verso la fine del Seicento prevalse l'uso di organizzare la vita civile e privata in base al tempo medio (cioè dell'orologio). (Restano interessanti esemplari di orologi, costruiti in una fase intermedia, che riportano contemporaneamente il tempo medio e quello solare: i cosiddetti *orologi a equazione*, con riferimento all'"equazione del tempo", vedi la nota 36). Si compie così un altro passo verso quell'emancipazione dal ritmo naturale diurno che era cominciata con la sostituzione delle ore variabili dei tempi altomedievali con le ore uniformi.

Malgrado i grandi progressi nella corsa alla precisione, resi possibili dalla regolazione mediante il pendolo e lo scappamento ad ancora, la misura della longitudine con metodi cronometrici restava un problema tuttora aperto: per quanto si moltiplicassero i progetti e i tentativi di apportare modifiche al sistema di regolazione, il pendolo continuava a rivelarsi disastrosamente sensibile ai movimenti irregolari cui gli orologi

erano sottoposti quando erano trasportati su una nave.³⁷ L'avvio alla soluzione del problema venne, ancora una volta, da Huygens, anche se, molto probabilmente, un altro grande scienziato, Robert Hooke, l'aveva trovata prima, pur tenendola a lungo per sé.³⁸ Si tratta di una soluzione rivoluzionaria, profondamente radicata negli studi che Huygens conduceva sui movimenti rotatori dei corpi rigidi; le oscillazioni del pendolo (dovute alla gravità) furono sostituite dalle oscillazioni di un corpo rigido (un "bilanciere", come venne poi chiamato, di forma a bacchetta o ad anello) che ruota attorno a un perno grazie al richiamo elastico di una sottile molla a spirale (una molla - capello) (Figura 21). Un tale regolatore presenta un tempo proprio (il suo periodo di oscillazione) che dipende dalla flessibilità della molla e dal momento d'inerzia del bilanciere e (teoricamente) non è sensibile a effetti inerziali che non siano rotazioni con forti componenti parallele all'asse del bilanciere.

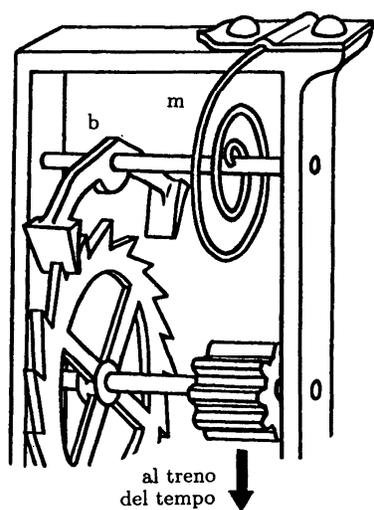


Figura 21: scappamento con molla - capello a spirale (m) e bilanciere ad ancora (b). (Seconda metà del '600).

Come era avvenuto per il regolatore a pendolo, anche il bilanciere si affermò saldamente e (salvo che nelle applicazioni all'astronomia) fece piazza pulita di tutti gli altri strumenti. Gli ultimi decenni del Seicento e i primi del secolo successivo videro la realizzazione di numerose "va-

riazioni sul tema” che consentirono non solo di costruire orologi fissi di precisione paragonabile a quella dei grandi orologi a pendolo, ma anche la diffusione di orologi portatili (da camera e da tasca) capaci di precisioni non molto inferiori.

In particolare, subito dopo la sua comparsa, apparve chiaro che il bilanciere prometteva di essere il regolatore giusto per riprendere la corsa al cronometro marino e alla misura della longitudine. Nel 1714 fu bandito dal Parlamento inglese l'ultimo e più importante premio (20000 sterline – vedi anche la nota 37) a chi avesse costruito un orologio in grado di non sbagliare di più di due minuti dopo un viaggio da Bristol alla Giamaica, nelle Indie Occidentali. Dopo più di due decenni John Harrison, un orologiaio dello Yorkshire, presentò alla commissione del bando un cronometro da lui stesso definito *time keeper* (custode del tempo) “atto a conservare l'ora malgrado le vicissitudini e le variazioni dell'atmosfera, i movimenti della nave, la dilatazione dei metalli e la loro contrazione dovute al caldo e al freddo”. Il cronometro fu provato in un viaggio di andata e ritorno tra l'Inghilterra e Lisbona, ma l'autore ricevette soltanto una piccola sovvenzione perché perfezionasse il suo lavoro. Si trattava di una macchina molto complessa, grossa e pesante (per quanto possa sembrare paradossale, aveva molte parti in legno), ma funzionava molto bene. La sua costruzione, tuttavia (per ammissione dello stesso autore), avrebbe avuto dei costi straordinariamente alti. Harrison costruì altri tre cronometri, usando solo metalli e semplificando molto il prototipo senza nulla perdere in precisione. Il quarto cronometro, più piccolo degli altri (solo 12 centimetri di diametro), ebbe un successo trionfale quando nel 1761 (con il figlio di Harrison) compì un viaggio di andata e ritorno da Bristol alla Giamaica risultando in errore di soli 5 secondi dopo 161 giorni di navigazione (determinazione della longitudine con un margine di errore inferiore a un miglio e mezzo). Però, soltanto dopo un secondo esperimento soddisfacente (tre anni di navigazione nella Polinesia dal 1772 sulla *Resolution* comandata da James Cook) l'intero premio venne finalmente assegnato.³⁹

Perfezionamenti al cronometro furono successivamente apportati dal francese Le Roy, dallo svizzero Berthoud e dagli inglesi Arnold e Earnshaw, tecnici di altissimo livello che operarono sia sui regolatori, sia sul treno del tempo, sia sui dispositivi motori. Ogni miglioramento significativo a un settore del congegno metteva in luce difetti in altre parti,

che, ovviamente, dovevano essere rimossi. Così, per esempio, modifiche utili a migliorare il controllo da parte del bilanciare, resero necessari interventi sui rotismi mirati a ridurre gli attriti nei perni. Fu tentato l'uso di lubrificanti, che, però, in poco tempo di funzionamento, si rivelò un rimedio peggiore del male perché l'usura – per quanto ridotta – produceva polvere che si impastava con il lubrificante introducendo irregolarità non accettabili. La soluzione fu trovata nell'adottare perni di acciaio (la metallurgia aveva fatto progressi rispetto al secolo precedente) e sedi in pietre dure (e preziose) come, per esempio, i rubini.

A cavallo tra Sette e Ottocento inizia anche la produzione in serie di orologi (specialmente da tasca) e la specializzazione delle lavorazioni. Si precisano “vocazioni” nazionali a questa industria, adombrate nei precedenti duecento anni dai diversi “stili” di lavoro e di prodotti: tra queste, l'organizzazione di centri di produzione della Svizzera e le manifatture inglesi. Queste ultime, in particolare, devono rispondere a una nuova richiesta di precisione capillarmente diffusa a causa dell'attivazione della rete ferroviaria in Gran Bretagna.

Con la seconda metà dell'Ottocento si giunge vicini al limite di precisione e affidabilità che si possano chiedere all'orologio meccanico. I problemi sono altri: la miniaturizzazione, la semplificazione dei meccanismi, l'abbassamento dei costi di produzione per la conquista di mercati sempre più ampi, ecc.

Nel mercato di massa che sostiene economicamente l'industria dell'orologio, è però presente una componente che richiede di non allentare la tensione verso una sempre maggior precisione. Settori della ricerca scientifica (l'astronomia, al solito, è in testa nelle richieste di precisione cronometrica) e della ricerca tecnologica, nonché industrie di vario tipo e attività legate al commercio e alle comunicazioni restano particolarmente sensibili a ogni progresso – anche piccolo – della cronometria.

Così, quando la scienza fisica tra metà Ottocento e primi del Novecento amplia i propri confini oltre l'area delle discipline che avevano caratterizzato i suoi esordi (meccanica, ottica, termologia, ecc.) per sviluppare l'elettromagnetismo e indirizzare la sua indagine verso regioni sempre più interne alla struttura della materia, l'arte della misura del tempo poté beneficiare di applicazioni rivoluzionarie delle nuove conoscenze.

3.9 Oltre l'orologio meccanico

La prima importante trasformazione moderna della tecnologia della misurazione del tempo ha i suoi antecedenti nelle osservazioni della piezoelettricità da parte di Pierre Curie, alla fine dell'Ottocento. Certi cristalli, tra cui quelli di quarzo, entrano in vibrazione se sono sottoposti a differenze di potenziale alternate. Questo effetto oscillatorio trovò una delle sue prime applicazioni nelle trasmissioni radio, dove cristalli di quarzo vennero usati come risonatori e regolatori di energia. Questa applicazione suggerì agli ingegneri in cerca di standard di frequenza affidabili che i cristalli potevano essere usati per produrre vibrazioni stabili, cioè potevano servire da orologi. Il principio fondamentale dell'oscillatore stava dunque trovando nuove forme d'espressione, che si riveleranno ben presto di gran lunga superiori al bilanciere e alla molla a spirale.

Poiché le frequenze tipiche dei cristalli di quarzo sono dell'ordine dei 100000 cicli al secondo era necessario dividerle in battiti più lenti e meglio utilizzabili. Per riuscire in questo intento fu necessario lo sviluppo di altre conoscenze scientifiche e tecnologiche, legate all'elettronica, ma la spinta per proseguire su questa strada da un punto di vista strettamente mirato alla cronometria si manifestò in modo deciso fin dall'inizio.

I cristalli di quarzo presentavano notevoli proprietà: non rivelavano quasi alcuna variazione di frequenza al cambiamento di temperatura (solo 2 o 3 milionesimi delle frequenze proprie per un grado Celsius), erano indifferenti alle variazioni di pressione atmosferica e le loro vibrazioni erano isocrone per qualsiasi ampiezza.

Il primo vero e proprio orologio al quarzo fu costruito negli Stati Uniti nel 1929 ai Bell Telephone Laboratories e dieci anni dopo un esemplare perfezionato fu installato nell'osservatorio di Greenwich, funzionando con margini di approssimazione inferiore ai due millesimi di secondo al giorno.

Altri orologi al quarzo vennero impiegati in osservatori astronomici e in laboratori di fisica ma la diffusione di strumenti portatili e da polso (l'orologio da polso aveva sostituito l'orologio da tasca presso il grande mercato dell'uso personalizzato della cronometria) fu assai limitato per altri vent'anni. Gli orologi al quarzo della prima generazione erano costosi, massicci, di aspetto grossolano rispetto alle forme snelle ed eleganti dei migliori orologi meccanici. La vita delle batterie che alimentavano i circuiti eccitatori dei quarzi era limitata, per leggere l'ora bisognava

premere un bottone, ecc.

L'inconveniente più serio risiedeva nel fatto che dopo circa un anno la stabilità dei quarzi svaniva e con essa l'indicazione dell'ora esatta.

Tuttavia, a partire dagli anni '60, l'evoluzione della tecnologia chimica per la produzione dei quarzi e soprattutto gli sviluppi della microelettronica e dei circuiti digitali impressero una svolta decisiva per la diffusione dell'orologio al quarzo.

La struttura fondamentale di questo strumento è mostrata nello schema della Figura 22: il regolatore in cristallo di quarzo (a) riceve energia da una piccola batteria (b) e vibra con frequenze di decine di migliaia di cicli al secondo.

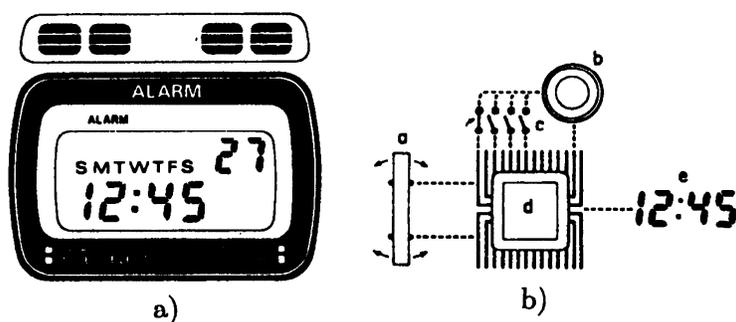


Figura 22: orologio digitale al quarzo: a) quadrante; b) schema circuitale.

La stabilità di tali frequenze assicura una accuratezza che comporta variazioni di pochi secondi al mese. Le vibrazioni del quarzo vengono raggruppate da un circuito binario che produce secondi contabilizzabili. Altri circuiti (c) forniscono le informazioni necessarie per attivare, mediante bottoncini dislocati in vari punti della cassa (vedi la Figura 22a), funzioni ausiliarie quali il calendario, la sveglia e altre. Un aspetto caratteristico dell'evoluzione dell'orologio al quarzo consiste infatti nell'essersi via via arricchito di funzioni collaterali all'indicazione dell'ora e dei minuti. La maggior parte dei modelli, oltre ai secondi, indica il giorno e la data, il mese e può emettere segnali acustici e luminosi programmabili, oltre a poter funzionare da cronometro nel senso di misuratore di durate anziché del tempo continuo.

Per quanto riguarda il modo con cui lo strumento segnala tutte le indicazioni cronometriche, la versione digitale (cioè per cifre variabili) è

la più frequente. I segnali provenienti da un microchip (d della Figura 22b), che è il modulo di un *time - computer*, passano all'indicatore dove attivano segmenti appropriati di cristalli liquidi (e) che costruiscono le cifre.

E' possibile collegare il regolatore al quarzo, mediante una trasmissione a ingranaggi, a una segnalazione "analogica", vale a dire con lancette girevoli. (In questo caso risulta però molto costoso aggiungere funzioni supplementari).

Gli anni che precedono la seconda guerra mondiale vedono i primi tentativi di utilizzare un diapason come regolatore. Solo dagli anni '60, però, questo regolatore poté essere realizzato con affidabilità e diffuso sul mercato.

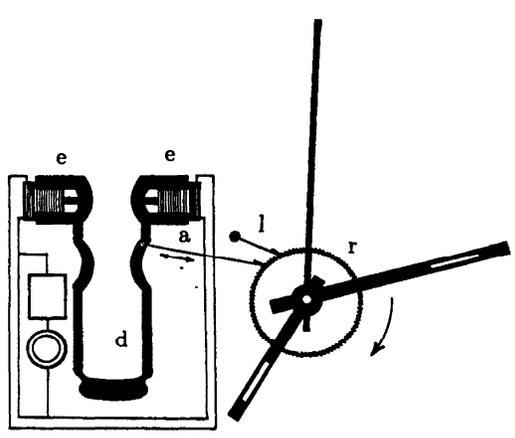


Figura 23: schema di funzionamento di un orologio con regolatore a diapason.

La Figura 23 mostra lo schema di funzionamento: un piccolo diapason (d) compie delle oscillazioni che sono rese permanenti da una interazione tra i rebbi e due bobine eccitatrici (e) collegate a un circuito oscillante alimentato da una pila. Mediante un sottilissimo ago (a) uno dei rebbi del diapason trasmette le proprie vibrazioni a una minuscola ruota dentata (r), che è la prima di un treno di ingranaggi che a sua volta muove le lancette sul quadrante di lettura. Una laminetta di arresto (l) trattiene la ruota impedendole di tornare indietro durante il ritorno del rebbio dal diapason. Poiché il diapason è molto piccolo (in un orologio da polso i rebbi possono essere lunghi da 10 a 15 millimetri circa) le sue

vibrazioni (con frequenze di qualche centinaio di hertz) hanno ampiezze minime: ciò comporta una estrema piccolezza di tutte le parti. La ruota dentata che muove il treno, per esempio, può avere un diametro di 2 o 3 millimetri, con un numero di denti che si aggira sui 300 (distanza tra i denti di 0.025 millimetri). Spinta dai colpi rapidi e leggeri dell'ago mosso dal diapason la ruota dentata (fatta di rame al berillio indurito) compie un giro in meno di un secondo, vale a dire quasi 40 milioni di giri in un anno. Malgrado ciò, non si ha usura, grazie alle bassissime forze in gioco. Grazie alla stabilità dell'oscillatore a diapason e alla qualità del meccanismo di graduazione e di trasmissione la Bulova, per esempio (la ditta americana più affermata nella produzione di questo tipo di orologio, il famoso "Accutron") garantisce la precisione dei suoi orologi con un'approssimazione di meno di un minuto al mese (due secondi al giorno) e, cosa ancor più importante, questo standard è dato per tutta la durata dell'orologio!

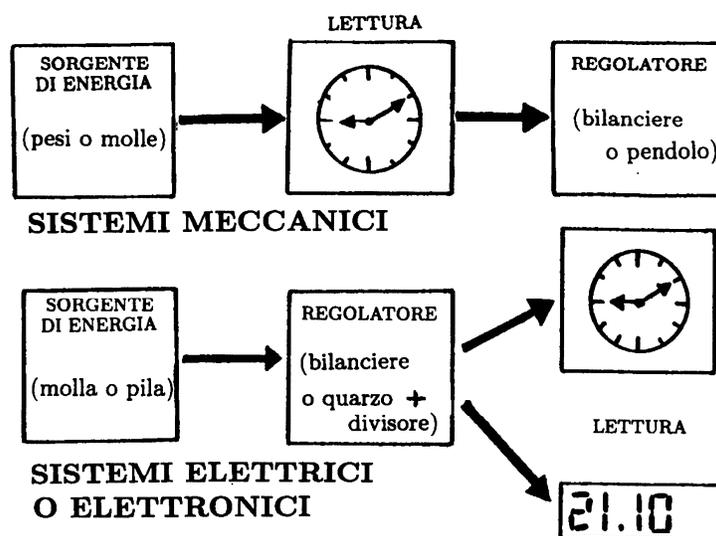


Figura 24: analogie e differenze nella struttura di orologi meccanici e orologi elettrici o elettronici.

E' interessante notare una differenza fondamentale tra gli orologi meccanici e quelli a regolazione elettrica o elettronica (Figura 24): premesso che per entrambi i tipi si possono riconoscere tre sezioni fondamentali:

una sorgente di energia, un quadrante che fornisce le informazioni cronometriche e un regolatore, sede del processo che genera il tempo proprio dell'orologio, nel primo caso l'energia fornita dai gravi o dalla molla che li sostituisce (vedi ad esempio la Figura 10) serve direttamente per azionare le lancette del quadrante ed è un treno di ingranaggi supplementari che trasmette il moto allo scappamento e al bilanciere, che hanno il compito di regolarizzare il moto arrestandolo e consentendogli di riavviarsi ad ogni battito. Nei sistemi elettrici ed elettronici il regolatore riceve direttamente energia dalla sorgente e invia segnali (solitamente mediante un amplificatore) al dispositivo di lettura (numerico - digitale o analogico mediante lancette).

La precisione fornita dai sistemi elettronici al quarzo, dagli elettrodiapason e da altri metodi simili, che è resa disponibile da molti orologi che abbiamo in casa o nei posti di lavoro o che portiamo al polso è di gran lunga sovrabbondante rispetto alle normali esigenze del nostro quotidiano. Tuttavia, anche se non ci pensiamo quasi mai, essa è diventata un fattore determinante e indispensabile all'intera organizzazione del nostro mondo. Non c'è computer, sistema di gestione di dati, rete di informazioni digitalizzate che non basi il suo funzionamento su un ordine di sequenze temporali generate, scandite, controllate da uno degli orologi dei tipi appena ricordati, specialmente di quelli con regolazione al quarzo. Senza contare impieghi più mirati in osservatori astronomici, laboratori di fisica e di altri settori scientifici. (Infatti, la scienza che ha reso fattibile quest'ultima rivoluzionaria fase della cronometria, è anche in prima posizione nell'utilizzarne la precisione).

Né questi traguardi sono stati definitivi: ci limitiamo a ricordare che tra il '50 e il '70 (ma le ricerche su questo tipo di cronometria sono tutt'ora in pieno svolgimento) sono stati realizzati orologi cosiddetti atomici, con i quali le misure di tempo sono effettuate in termini di oscillazioni caratteristiche di certi atomi o di certe molecole. Il tempo proprio di questi strumenti è ancora più piccolo che per i quarzi piezoelettrici e di conseguenza è più grande il grado di precisione: sono state raggiunte e superate precisioni corrispondenti a errori relativi di 10^{-12} , il che equivale a uno scarto di 1 secondo ogni 30000 anni.

Osservando la Figura 25, che riassume le precisioni raggiunte dai vari metodi a partire dagli orologi meccanici del '600, viene da pensare che pur non sapendo molto bene che cosa sia il tempo e se nemmeno esiste,

tuttavia è la grandezza fisica che abbiamo imparato a misurare con la precisione maggiore.

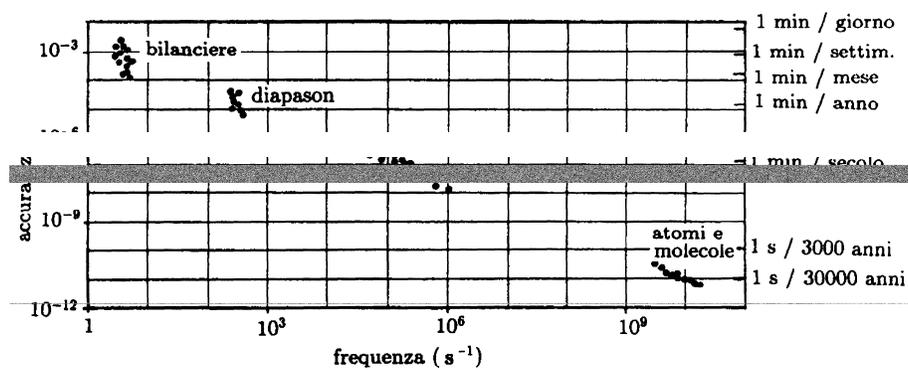


Figura 25: accuratezza consentita dai diversi metodi di regolazione impiegati dal '600 ad oggi.

4 Note

1. E' accertato che in molti esseri viventi sono presenti dei processi biologici la cui attività varia in modo ciclico e che, pertanto, funzionano da "marcatempo". Per ogni specie che presenta tali processi, essi si sono stabiliti nel corso della sua evoluzione modellando la loro periodicità sul ritmo di fenomeni esterni particolarmente importanti per l'attività che la specie svolge nel suo ambiente e nella sua nicchia ecologica.

Così, oltre ai marcatempi biologici accordati con l'alternarsi del giorno e della notte, con il periodare del ciclo lunare e con l'avvicinarsi delle stagioni (che sono i più diffusi tra le specie) se ne conoscono anche di molto particolari. Per esempio, crostacei e altri organismi il cui habitat è la fascia di litorale alternativamente emersa e sommersa con le fasi della marea, presentano cicli aventi periodicità di sei ore.

Acquisiti come fattori genetici, molti di tali processi avvengono indipendentemente dalle condizioni esterne (come provano molte esperienze condotte in situazioni ambientali artificiali) e sono generalmente sfasati in anticipo sulle modificazioni dell'ambiente di cui ripetono la periodicità. (L'orso, ad esempio, incomincia ad accumulare grasso per il letargo assai prima che giunga il freddo, quando ancora non vi è carenza di cibo.)

Anche la specie umana presenta andamenti periodici delle variazioni funzionali di organi e apparati: pur essendo, in genere, correlabili alle variazioni esterne, essi mostrano una sorta d'inerzia ad adeguarsi ai cambiamenti ambientali e quindi conservano una loro funzione di marcatempo.

Sul piano psicologico, la presenza di un marcatempo biologico (associata alla capacità di fissare le sensazioni nella memoria) è probabilmente alla base dell'attitudine dell'uomo a ordinare in sequenza gli eventi (e, con il costituirsi del concetto di tempo, a "ordinarli temporalmente"), avvertirne la durata e paragonarli tra loro. La nostra sensazione del tempo si presenta così, con un aspetto dominante per il quale lo "scorrere del tempo" ha carattere continuo e uniforme. Tale uniformità, tuttavia, può subire delle variazioni: una caratteristica dei processi biologici che funzionano da marcatempo nella nostra specie consiste nel produrre una "scansione" del tempo più rapida al crescere della temperatura corporea e all'aumentare in quantità e in intensità degli stimoli esterni. (Questo probabilmente spiega perché gli intervalli temporali siano sottovalutati dalle persone che si trovano in isolamento totale e perché una giornata di inattività e di noia sembri molto più lunga di una animata e vivace. Da questo punto di vista, il nostro marcatempo biologico sembra valutare il tempo in base alla quantità di impressioni ricevute). Anche il modo con cui viene utilizzata la memoria degli stimoli e delle esperienze gioca un ruolo importante nel "restituire" alla mente la sensazione del tempo,

come sembrano indicare le percezioni “anomale” del tempo durante i sogni o durante gli stati neuro - psicologici indotti da particolari malattie, farmaci o droghe. (Tra le malattie, la sindrome di Korsakoff dà luogo alla incapacità di realizzare qualsiasi ordinamento temporale.)

2. Nel corso della storia del pensiero umano dall’antichità fino ad oggi, la natura del tempo è stata oggetto di innumerevoli disquisizioni. Accanto a posizioni profondamente dubitative (un passo di Sant’Agostino è particolarmente illuminante: “Il tempo è quella cosa che se nessuno mi chiede, so che cos’è, e se qualcuno mi chiede, non so dire”) o a punti di vista alternativi (come quelli, per esempio, di Huygens e Leibnitz che sostengono un concetto di tempo relativo ai fenomeni e alle osservazioni che li caratterizzano), prevarrà un’idea del tempo come di una entità assoluta e reale.

Nel campo delle scienze naturali, questa posizione trova la sua espressione più autorevole in Newton: “Il tempo assoluto, vero e matematico scorre conforme alla sua natura uniformemente e senza rapporto con alcun oggetto esteriore . . . ; si possono ritardare e accelerare tutti i movimenti, ma non il fluire del tempo”. Tuttavia, l’indagine del mondo fisico metterà in crisi tale posizione: con un precursore in Mach nella seconda metà dell’Ottocento, sarà Einstein a chiarire i termini del problema. Egli inizia la sua revisione dei concetti di spazio e tempo della meccanica classica con la seguente affermazione: “Le esperienze di un individuo ci appaiono disposte in una serie di eventi e in tale serie i singoli eventi che noi ricordiamo appaiono ordinati secondo il criterio di “prima” e “poi”, criterio che non può essere ulteriormente analizzato. Per ogni individuo esiste pertanto un tempo soggettivo che non è in se stesso misurabile. Si può invece associare dei numeri agli eventi, in modo tale che fra due eventi quello posteriore sia caratterizzato dal numero maggiore; però la natura di questa associazione può essere del tutto arbitraria. La si può definire per mezzo di un orologio, paragonando l’ordine degli eventi da questo forniti con l’ordine di date serie di eventi. Per orologio si intende qualcosa che fornisce una serie di eventi numerabili e che ha altre proprietà delle quali parleremo più tardi . . .” (A. Einstein, *Il significato della relatività*, Ed. Einaudi, Torino, 1953). Einstein evidenzia così la doppia struttura del concetto di tempo relativo ai fenomeni: quella topologica (che traduce il *corso* degli eventi) e quella metrica (che fornisce criteri per la *misurazione della loro durata*), entrambe strettamente collegate al mutare della realtà. E’ chiaro come questo concetto di tempo non abbia significato in assenza di avvenimenti fisici.

A questo proposito è interessante ricordare che alcuni studi di antropologia hanno messo in luce il fatto che presso certe culture selvagge non esistevano parole per il concetto di tempo ma solo termini per in-

dicare relazioni temporali come, per esempio, i nostri “prima”, “dopo”, “durante”, ecc. (Non è stato chiarito se questo fatto sia dovuto a una incompletezza nel processo che nelle altre culture ha portato al concetto di tempo o se costituisca un fenomeno di regressione.)

3. In realtà, anche la costruzione degli utensili litici che precedono il Paleolitico superiore implica delle capacità di astrazione: dalla fase “progettuale” dell’utensile che si vuol realizzare, alla ricerca del materiale più adatto, alla scoperta - invenzione della tecnica in grado di realizzare certe caratteristiche dell’utensile fino allo sviluppo di abilità nello sfruttare al massimo la materia prima, la documentazione archeologica testimonia fin dagli albori delle culture materiali un evidente crescendo nello sviluppo di capacità di “pensare nel futuro” possedute dagli esseri umani e dai loro precursori ominidi.

Le rappresentazioni figurative e i motivi decorativi del Paleolitico superiore costituiscono una grande novità perché testimoniano che si sono avviati dei processi mentali analogici, cioè non solo astratti ma anche tali da consentire, mediante il trasferimento di caratteristiche da un contesto a un altro, la costruzione di metafore e di simboli codificati per esprimerle.

Da questo punto di vista, non è casuale che l’Aurignaziano segni anche l’inizio dell’arte figurativa e il diffondersi di pratiche magico - religiose mirate sia alla mimesi con il mondo naturale sia a stabilire forme di “dominio” su di esso.

4. Come è noto, dopo aver raggiunto la maturità sessuale, i salmoni lasciano il mare aperto e, risalendo i fiumi fino all’alto corso, raggiungono (spesso a centinaia di chilometri dalle coste) i luoghi dove sono nati, per riprodursi. Tali ingenti migrazioni si compiono in poche settimane nella tarda primavera e si concludono, dopo la deposizione e la fecondazione delle uova, con la morte di moltissimi adulti stremati dalla fatica e dal digiuno.

Questa facile ed abbondante preda costituì una importante fonte alimentare periodica per i magdaleniani che già avevano “inaugurato” la pratica della pesca accanto alle attività della caccia, come testimonia l’ampia diffusione in tutta l’Europa di questo periodo di arpioni in osso e in avorio. Era però importante conoscere in anticipo il periodo di questa rapida risalita dei fiumi per approntare trappole e fiocine e organizzare le spedizioni ai corsi d’acqua.

Le placchette magdaleniane (e forse anche quelle aurignaziane) indicano che il problema è stato risolto usando il ciclo lunare come marcatempo per “misurare” la durata annuale del ciclo dei salmoni ed effettuare previsioni.

5. Grazie alla sua luminosità (dopo il Sole e Venere è l'astro più brillante), Sirio è visibile anche quando sorge all'orizzonte già illuminato dal Sole nascente. Per questo motivo, probabilmente, gli antichi astronomi scelsero il sorgere contemporaneo di Sirio e del Sole come inizio dell'anno egizio. Oltretutto per i suoi significati magico - religiosi, la definizione della durata dell'anno e la scelta del giorno iniziale in corrispondenza con un momento preciso del ciclo solare avevano un alto valore pratico in quanto consentivano di collocare nel calendario (e quindi prevederla) la piena del Nilo, fattore vitale per l'agricoltura e per la stessa esistenza dell'Egitto. Per quel momento, preparati i campi ad accogliere il prezioso limo che le acque stavano per lasciare sul terreno (e nel quale, subito dopo, sarebbe stata effettuata la nuova seminazione), L'Egitto doveva apprestarsi alla sospensione di ogni attività.

Poiché, infine, l'anno civile egizio venne fissato in 365 giorni, era necessario tener conto del suo ritardo (un giorno ogni quattro anni) rispetto al ciclo astronomico. Gli astronomi egizi avevano compilato, per questo, delle tabelle grazie alle quali si poteva valutare anno dopo anno la differenza tra l'anno del calendario e l'anno astronomico sirio - solare. Così, sulle iscrizioni di alcuni monumenti egizi si legge che il sorgere eliaco di Sothis (nome egizio di Sirio) è avvenuto non all'inizio dell'anno civile ma in un dato giorno di un determinato anno del regno di un certo re. Le moderne tabelle della curva di Sirio ci permettono oggi di tradurre questi dati astronomici in date precise. Poiché inoltre l'anno sirio - solare e l'anno civile partono insieme ogni 1450 anni è stato possibile far risalire in modo ragionevolmente affidabile l'avvio del calendario egizio a una data intorno al 4200 a. C.

6. La scelta di uno o più processi da utilizzare come "sorgenti" di "durate campione" è, in linea di principio, arbitraria. Il fatto che la formalizzazione dell'andamento di un fenomeno ci consente di individuare l'eventuale uniformità nella sua evoluzione temporale ci può aiutare molto nell'orientare le nostre scelte ma non offre una garanzia assoluta. Infatti, la formalizzazione, oltre al fatto che interpreta sempre un modello più o meno semplificato, si basa essa stessa, di fatto, sull'idea che esista un tempo assoluto *dentro* il quale collochiamo il fenomeno che dovrebbe definirlo: quindi si tratta in ultima analisi di una tautologia. E' però possibile un approccio operativo: scelti più tipi di fenomeni, possiamo attivarli in altrettante classi di orologi ed effettuare le misure della durata di uno stesso fenomeno "di prova". Ogni orologio darà una sua misura della durata dell'evento di prova, in relazione alla durata del suo tempo proprio. Ripetendo le misure di un secondo evento di prova, si possono confrontare i rapporti tra le due misure ottenute per ogni orologio. Ripetendo per altri fenomeni di prova e confrontando i rapporti, è

possibile selezionare una classe di orologi (e dei corrispettivi fenomeni di riferimento) che contenga tutti e solo quegli strumenti che, entro i limiti di sensibilità dei singoli orologi, mostrano di essere coerenti, cioè di dar luogo agli stessi rapporti tra le varie misure.

In questo stesso volume è descritta una esercitazione didattica dedicata a questo problema.

7. Tra i processi ad andamento continuo, ne ricordiamo alcuni che, pur non essendo stati usati come base di orologi, consentono misure nella sfera del tempo sotto forma di *datazioni*, e cioè:
 - il decadimento di radionuclidi naturali, che, tramite la misura della radioattività residua di un campione, consente di valutarne l'età in termini di multipli della vita media;
 - la formazione, in strutture cristalline di certi minerali, di centri termoluminescenti la cui densità in un campione è proporzionale al tempo di esposizione alla radioattività di fondo del terreno in cui il campione si è conservato;
 - i ritmi di accrescimento di quasi tutti gli alberi, che consentono datazioni di materiali legnosi tramite il conteggio degli anelli annuali (dendrocronologia).
8. Un discorso analogo ma più complesso vale anche per le ombre lunari che, sia pure con una diffusione molto minore, sono state anch'esse utilizzate per la misura del tempo notturno.
9. Le frazioni del giorno furono dette ore. Nel passato si ebbero due sistemi di ore. I romani, per esempio, usarono sia le *horae ineguales* o *temporales* che dividevano il giorno e la notte ciascuno in dodici parti corrispondenti a rotazioni uguali dell'ombra dello stilo e che, quindi, erano di durate diverse e variabili lungo il ciclo delle stagioni (con differenze massime al solstizio d'estate e a quello invernale) e le *horae aequales* o *equinoctiales*, costituenti realmente la ventiquattresima parte del giorno solare. Quest'ultima divisione, consentita dal perfezionamento dei quadranti solari introdotti in Roma dopo la conquista della Grecia, rimase di gran lunga meno diffusa del sistema delle ore inuguali, che passò alla Chiesa e fu comunemente usato fino al tardo Medioevo. Con l'inizio del XIII secolo si ha una ripresa del sistema delle ore uguali (più adatto a gestire la nascente attività mercantile nelle città dell'Europa) che soppiantò il precedente nel XIV secolo. E' di questo periodo anche l'adozione, da parte degli astronomi (e dei costruttori di orologi), della numerazione delle ore da 0 a 24 (anziché da 0 a 12 diurne e da 0 a 12 notturne).
10. In alcuni siti archeologici dell'antico Egitto, risalenti al III millennio a. C., si sono trovate linee meridiane di dimensioni monumentali il cui gno-

mone era costituito da un obelisco. (E' stato notato che essendo orientate verso il Nord di allora, non puntano ora verso la Stella Polare ma verso un'altra regione del firmamento, in buon accordo con il moto di precessione della Terra.)

Una meridiana analoga a quelle egiziane era stata realizzata in età augustea nel campo Marzio in Roma usando come gnomone un obelisco egizio e, sempre in Roma, al centro di Piazza S. Pietro un altro obelisco egizio è lo gnomone di una linea meridiana di proporzioni monumentali, realizzata intorno al '600.

Tra i secoli XIV e XV si diffonde una forma particolarmente suggestiva di linea meridiana realizzata in ambienti semiaperti come colonnati o logge o interni, soprattutto chiese. La punta dello gnomone è sostituita da un foro praticato nella volta o alla sommità di una parete meridionale; attraverso questo foro il Sole, nel suo punto di massima altezza, cioè nel transito al meridiano, proietta un raggio luminoso su una linea incisa o intarsiata nel pavimento e corredata da diversi tipi di dati calendariali (case zodiacali, mesi, periodi in cui può cadere la Pasqua, sequenza delle settimane, ecc.). Una, bellissima (e tra quelle di più tarda costruzione) è, ad esempio, in Santa Maria degli Angeli a Roma; famose sono pure le linee meridiane del Duomo di Milano e di S. Petronio a Bologna, quest'ultima disegnata dal grande Cassini.

Quale che sia il gusto che si possiede per considerazioni di tipo razionale (sulla dottrina e maestria dei costruttori, o sulla sensibilità di lettura delle informazioni che lo strumento fornisce, o su altri aspetti oggettivi) è difficile che l'“appuntamento” tra lo sfolgorante mondo solare esterno e la penombra del mondo interno della chiesa, – che si compie sotto i nostri occhi quando la vivida macchia di luce intercetta silenziosamente la linea meridiana – non produca l'emozione di una sospesa meraviglia: come davanti agli altri tipi di meridiane, non si può facilmente sottrarsi all'incanto che questi sapienti giochi d'ombra e di luce (così intimamente permeati della sottile malinconia del tempo che fugge) sono capaci di suscitare.

11. Nel corso della storia dell'orologio solare, questo strumento assunse una grande varietà di forme ben documentate da reperti archeologici per gli esemplari antichi e ancora osservabili sui muri di palazzi storici, chiese, ville, ecc. per gli esemplari costruiti negli ultimi duecento anni.

Tra gli esemplari antichi sono scarse le meridiane da muro per il semplice motivo che, col tempo, sono scomparsi i muri stessi: è abbastanza diffusa, invece, la meridiana con superficie emisferica cava (*hemicyclum* o *hemispherium*), presente inizialmente nelle città dell'Asia Minore e dell'Egitto, ma poi gradualmente costruita in tutto il mondo antico me-

diterraneo, ad opera di laboratori specializzati che tenevano anche conto delle modifiche da apportare ad ogni strumento in vista della diversa latitudine cui era destinato.

Quando questo quadrante solare passa a Roma, viene inizialmente utilizzato in modo grossolano, impiegando in città semplicemente strumenti portati via da città della Magna Grecia o di altre zone senza tener conto del cambiamento di latitudine. E' interessante, a questo proposito, un passo di Plinio che (con amara ironia per la indifferenza romana in tema di scienze esatte) riporta che ci siano voluti ben 99 anni per accorgersi che un emiciclo portato a Roma dalla Sicilia, dava indicazioni inesatte. Plinio riporta inoltre che tale strumento viene fatto sostituire da un censore: tra le funzioni dei censori, infatti, era compreso il compito di vigilare sugli orologi pubblici. Questa breve citazione di una testimonianza letteraria sulla presenza e sull'uso dell'orologio nel mondo antico è soltanto una fra le numerosissime che si potrebbero portare. L'orologio solare (insieme a clessidre e orologi ad acqua di tipo più complesso) viene frequentemente citato nella letteratura antica (e non solo in ambito greco e romano) come una presenza consueta nella vita delle città, uno strumento di controllo e di misura del tempo connesso a una grande varietà di attività: commercio, artigianato, attività forensi, appuntamenti con clienti (e non . . .), perfino riunioni accademico - poetiche (agli esordienti letterati era concesso un certo "numero di clessidre", e non di più . . .), ecc.

12. Circa la modalità di computare il tempo, più frequentemente le meridiane indicano le cosiddette *ore francesi*, corrispondenti alla ordinaria numerazione che fa terminare il giorno alla mezzanotte (ventiquattresima ora). Questo sistema è, sotto certi aspetti, il più naturale in quanto fa coincidere il momento centrale del giorno (il "mezzogiorno" appunto) con il transito del Sole al meridiano.

Altri sistemi si basano su criteri diversi: ricordiamo, ad esempio, il sistema delle *ore italiane* secondo il quale il giorno (sempre di 24 ore) termina al tramonto. Si tratta di un sistema ispirato da una visione antropocentrica del tempo secondo la quale le attività diurne e il lavoro devono concludersi con l'avvento della notte, destinata al riposo, per dar luogo a un nuovo ciclo. Poiché il momento del tramonto varia con le stagioni, questo sistema non può basarsi su una semplice trasposizione della numerazione delle ore: nel quadrante ad ore italiane le tracce orarie non convergono in un punto, ma presentano un andamento assai più complesso e più difficile da realizzare rispetto al quadrante a ore francesi. Lo gnomone esce perpendicolarmente dalla parete in corrispondenza della ventiquattresima ora e l'ombra della sola punta dà l'indicazione delle altre ore.

Diffuso soprattutto in Italia fin dal secolo XIII, l'orologio a ore italiche svolgeva una particolare funzione, connessa con l'uso medioevale di chiudere le porte di città, borghi e castelli con la fine del crepuscolo, cioè mezz'ora dopo il tramonto. Fornendo l'indicazione quasi diretta di quante ore mancano al tramonto, un orologio a ore italiche collocato in città alla sommità di una torre o ben visibile in alto su pareti vicino alle mura, dava modo a chi lo osservava da fuori città o dai campi circostanti il borgo di sapere quanto tempo aveva a disposizione prima che le porte venissero sbarrate.

Venute meno queste usanze nel corso del '500 e del '600, l'uso delle ore italiche decadde fino ad essere proibito in epoca napoleonica. Per questo motivo le meridiane ad ore italiche sono molto più rare di quelle ad ore francesi.

13. Si tratta, come è noto, delle coordinate che individuano la posizione di una stella nella sfera celeste locale: l'altezza è l'angolo formato dalla retta osservatore - astro e da quella osservatore - orizzonte nel piano verticale che contiene la stella, mentre l'azimut è l'angolo compreso tra questo piano e il piano meridiano (si computa a partire da sud a ovest). Nell'arco di una giornata il Sole, iniziando il suo percorso dal punto di levata e concludendolo nel punto di tramonto, descrive una curva che implica una relazione tra altezza e azimut a ogni istante. Giorno dopo giorno, tale curva (e, ovviamente, le funzioni del tempo che esprimono le coordinate alt - azimutali) cambia di lunghezza e di posizione passando dalla traiettoria di massima altezza sul meridiano (culminazione) del solstizio d'estate a quella di minima culminazione del solstizio d'inverno. (Ai due giorni equinoziali tale curva coincide con il semiequatore celeste).
14. Il criterio di utilizzare le coordinate alt - azimutali del Sole per misurare il tempo del giorno è stato applicato anche alla misura del tempo nell'anno, come sembrano indicare le più recenti interpretazioni di molte vestigia megalitiche sparse nell'Europa Occidentale. Si tratta dei cerchi concentrici (*cromlech*) e degli allineamenti di *menhir* (enormi pietre rizzate verticalmente), che ancor oggi si ergono, carichi di solenne suggestione, in molti siti soprattutto della Bretagna e delle Isole Britanniche (celebri, per esempio, sono Stonehenge e Carnac). Essi testimoniano di civiltà agricole fiorite nel corso del III millennio ai margini e con limitati contatti con le culture mediterranee.

Frutto di osservazioni plurisecolari, deve essere entrata nel patrimonio magico - astronomico della cultura di queste antiche popolazioni neolitiche la consapevolezza che, per un determinato luogo, i punti dell'orizzonte in cui avvengono il sorgere e il tramonto del Sole si spostano (tra i due momenti dell'anno che oggi chiamiamo i solstizi) in un vasto settore che,

anno dopo anno, è sempre lo stesso.

L'idea di materializzare queste posizioni estreme allineando enormi pietre parzialmente infitte nel suolo, è alla base dei monumentali allineamenti (molti menhir hanno dimensioni confrontabili con gli obelischi egizi). L'esperienza deve anche aver insegnato che la culminazione del Sole avviene sempre nel piano bisecante dell'angolo formato dalle precedenti direzioni e che la perpendicolare a tale bisecante segna sull'orizzonte i punti in cui il Sole si leva e tramonta nei due giorni di equinozio.

Nel sistema di riferimento degli allineamenti solstiziali, l'osservazione del punto di levata (o di tramonto) del Sole sull'orizzonte consentiva una valutazione calendariale della posizione di ogni giorno nell'arco dell'intero ciclo solare e, soprattutto, stagionale (la funzione pratica era infatti finalizzata alla gestione dell'agricoltura). Naturalmente, quanto più numerosi erano gli allineamenti, tanto migliore era la precisione di tali osservazioni: da qui l'evoluzione da "ventagli" di allineamenti alle strutture a cerchi concentrici dei cromlech.

15. Dal tempo di Augusto, clessidre e orologi ad acqua affiancarono gli orologi solari nello scandire il tempo dell'*Urbs*; *clepsydrarii* ed *organarii* gareggiavano in abilità nella fabbricazione e nella sistemazione di orologi idraulici e dei loro accessori. Gli *horologia ex aqua* descritti da Vitruvio erano muniti di congegni automatici che ad ogni cambiamento di ora lanciavano in aria sassi oppure emettevano suoni avvisatori. Le case dei ricchi privati erano attrezzate di orologi ad acqua non meno che gli edifici pubblici; per i loro proprietari questi strumenti costituivano la prova tangibile dell'agiatezza e della distinzione.

Gli orologi ad acqua erano periodicamente tarati con i quadranti solari; tuttavia (anche per il fatto che non sempre le stesse meridiane erano costruite per la latitudine di Roma) l'accordo tra i vari strumenti doveva essere tutt'altro che buono, se, per esempio, Seneca afferma che "a Roma è impossibile sapere l'ora esatta ed è più facile conciliare tra loro i filosofi che accordare gli orologi".

Questo stato di cose indica che l'orologio soddisfaceva ormai più una esigenza di moda che reali necessità pratiche (le quali, per altro, erano rimaste assai rudimentali). Tuttavia, era attivo un servizio pubblico di suonerie e di segnalazioni a voce che scandiva i "quarti" in cui era suddivisa la giornata.

I romani, infatti, indicavano le 12 ore che dividevano sia il giorno che la notte numerandole *hora prima*, *hora secunda*, ecc. ma adottarono una suddivisione più grossolana del giorno naturale, dividendolo dall'alba al tramonto in quattro parti che presero il nome dall'ora che terminava la suddivisione: *hora tertia* (in ore attuali, e per un giorno equinoziale,

dalle 6 alle 9), *sexta* (9 - 12), *nona* (12 - 15), *duodecima* o *vespera* (15 - 18).

16. Il computo della Pasqua dipende dall'anno solare essendo legato all'equinozio di primavera e da quello lunare perché fa riferimento a un plenilunio. Tale dipendenza lunisolare fu introdotta da Papa Vittore (Concilio di Roma del 196) operando una leggera modifica rispetto alla datazione della Pasqua ebraica. Il I Concilio di Nicea (325) stabilì poi una regola più precisa, ponendo la Pasqua nella prima domenica successiva al primo plenilunio di primavera. Il mondo cristiano, però, si uniformò a tale norma solo nel secolo VIII, nell'ambito di un ampio programma di sistemazione della liturgia, che accolse la rideterminazione al 21 Marzo della data dell'equinozio.
17. Perché la puntualità era così importante? Una ragione stava nel fatto che un ritardo poteva costringere ad abbreviare la funzione, particolarmente i mattinali. Un altro più profondo motivo stava nell'idea che la simultaneità fortificasse la preghiera, tant'è vero che le devozioni si dovevano "cantare a voce alta": "cantare" voleva dire cantare insieme (Non a caso S. Gregorio Magno (VI secolo) rivolse una cura particolare alla musica sacra, che volle nella solenne forma corale e puramente vocale del canto che da lui prese il nome).

La strada della salvezza generale sembrava poter essere una moltiplicazione delle devozioni, secondo uno spirito per cui il tutto è maggiore della somma delle singole parti: era questo, in effetti, il senso di ogni comunità monastica.

18. Per alcuni secoli si attribuì l'invenzione dell'orologio meccanico al canonico francese Gerberto, poi Papa Silvestro II (999 - 1003), il papa dell'anno Mille. Gerberto fu una delle personalità più eminenti della cultura alto-medioevale: oltre a scritti di filosofia, teologia e dottrina liturgica, lasciò testimonianze di vasti interessi per la scienza del suo tempo. Aveva imparato la matematica e l'astronomia in Spagna da scienziati musulmani ed ebrei e aveva portato con sé un patrimonio di conoscenze e di tecniche presumibilmente sufficiente a consentirgli di costruire un orologio meccanico. Ma non ci sono prove dell'invenzione e non si capisce come i primi documenti archeologici e testuali parlino di orologi meccanici soltanto dopo più di 250 anni. Il fatto che nemmeno degli orologi idraulici alto-medievali è rimasta traccia né l'ipotesi di reimpiego di parti meccaniche da una generazione di orologi alla successiva (sicuramente praticato più tardi per utilizzare al massimo il ferro e l'ottone che a quei tempi erano materiali di valore) sono sufficienti a spiegare un silenzio così prolungato su un'invenzione tanto notevole.

19. L'ipotesi che gli svegliares siano stati i precursori dei veri e propri orologi meccanici è suffragata oltre che da un'analisi delle esigenze della società che li ha prodotti, anche da un'interessante prova etimologica. Mentre in alcune lingue europee lo stesso nome *horologium* che indicava meridiane, clessidre, orologi ad acqua è passato al congegno meccanico (il francese *horloge*, l'italiano *orologio*, lo spagnolo *reloj*) in altre si registra la novità con un nome nuovo: gli inglesi chiamarono il nuovo congegno *the clock*, olandesi e fiamminghi *Klokke*, ecc., cioè con lo stesso nome della campana (*clock* in inglese, per esempio). Gli stessi francesi che si tennero il vecchio termine per l'orologio, cambiarono però proprio in questo periodo il nome alla campana da *sein* (dal latino *signum*) a *cloche*. Era venuto alla ribalta qualcosa di nuovo: dal punto di vista della loro autentica natura e della loro funzione, queste macchine segnatempo nacquero come campane automatiche.
20. Anche gli astronomi, del resto, erano attivi spesso in entrambi i campi, com'è il caso, per esempio, dello stesso Keplero, "matematico imperiale" a Praga ma anche astrologo ufficiale della corte boema.
21. Negli orologi più semplici il funzionamento della macchina astronomica si basava sull'utilizzazione di tre ruote dentate (ciascuna collegata a una particolare fascia del quadrante) guidate da uno stesso pignone mosso dalla macchina oraria; le tre ruote dentate erano: la ruota dell'eclittica, con 365 denti, la ruota del Sole, di 366 denti e la ruota della Luna con 379 denti. La macchina oraria guidava direttamente l'asta delle ore.
22. Tra le numerose "fasce" o "corone" sono particolarmente evidenti la più esterna, che porta la successione delle ore in numeri romani da I a XXIV partendo da Est e la grande corona con la raffigurazione delle costellazioni zodiacali (con l'indicazione delle stelle principali).

Sulle altre corone erano riportati i nomi dei mesi, i giorni dell'anno, i dodici segni zodiacali indicati dai loro simboli e accompagnati dalla tipologia astrologica (M o F per "maschili" o "femminili", MO, FIX, CO per "mobili", "fissi" o "comuni"), indicazioni particolari sui pianeti, ecc. Al centro del quadrante stanno tre dischi concentrici, sovrapposti, di dimensioni diverse.

Il disco inferiore è il più grande e porta la classica immagine a raggiera ondulata del Sole con la relativa asta che raggiunge le corone più esterne indicando la posizione dell'astro sulla fascia zodiacale. Questa asta compie un giro in 365 giorni (corrispondente a un anno non bisestile) ruotando in senso contrario a quello delle ore. Nella zona più interna del disco, tutt'attorno al bordo del disco intermedio (che è quello della Luna) c'è una fascia con ventinove spazi e mezzo, numerati, che indicano l'"età" della Luna: l'insieme delle suddivisioni corrisponde alla durata

in giorni dell'apparente rotazione della Luna intorno alla Terra (cioè il *mese sinodico*, l'intervallo tra due ritorni della Luna alla stessa fase).

Il disco lunare porta, in tangenza, l'immagine circolare della Luna, con relativa asta che si prolunga anch'essa fino alla fascia zodiacale e dà contemporaneamente l'età della Luna e la sua posizione sullo zodiaco. Inoltre, da una finestra circolare aperta in questo disco appare l'aspetto della fase lunare del giorno.

Le figure geometriche (esagono, quadrato, triangolo) aventi un vertice comune nell'immagine della Luna indicano particolari allineamenti dei maggiori corpi celesti ed avevano una funzione esclusivamente astrologica.

Il disco minore al centro del planisfero rappresenta la Terra, posta quindi, anche nell'orologio come nel modello tolemaico, al centro dell'Universo; l'asta solidale con questo disco indica le 24 ore a partire dalla levata equinoziale del Sole, corrispondente alle sei dell'attuale sistema di conteggio.

La quarta asta è particolarmente interessante: innanzitutto è doppia e porta da una parte una testa di drago e dall'altra la coda. Indica le eclissi di Sole e di Luna e ciò spiega l'uso del simbolo medievale del drago, che ingoia l'astro in eclisse e poi lo restituisce.

La possibilità di prevedere le eclissi si deve al fatto che la traiettoria della Luna intorno al Sole è una linea sinuosa che segue, intersecandola, l'orbita terrestre. La Luna percorre questa linea ritornando in una posizione quasi identica rispetto al Sole e alla Terra in un periodo di poco superiore ai 18 anni e ripetendo le eclissi nello stesso ordine. Le sinuosità non giacciono esattamente nel piano dell'eclittica (e ciò fa sì che non si abbia un'eclisse di Sole ad ogni novilunio e una di Luna ad ogni plenilunio) e i tre astri possono essere allineati (o molto vicini all'allineamento) e quindi dare eclissi, solo in corrispondenza di una retta che interseca l'eclittica in due punti.

Il verificarsi di un'eclisse si può desumere con un certo anticipo dalle posizioni delle aste del Sole e della Luna rispetto all'asta del Drago: quando il disco del Sole è prossimo alla testa del Drago e ad entrambi si avvicina il disco della Luna, sta per avvenire un'eclisse di Sole. Se l'asta della Luna si avvicina alla coda del Drago mentre il Sole è prossimo alla testa, si avrà un'eclisse di Luna.

23. Si tratta di due "automi" in bronzo con meccanismi interni di snodo che, allo scoccare delle ore, danno alle statue, per un breve momento, una parvenza di vita. Forse evocano la medioevale figura del campanaro, per altro già sostituita dalle suonerie meccaniche? (ogni periodo si compiace degli automatismi che è capace di produrre ...).

24. In accordo con questo significato attribuito allo scorrere del tempo (che dagli orologi italiani è assente anche nella componente astrologica del loro messaggio) i quadranti degli orologi tedeschi o boemi del XVI - XVII secolo sono inseriti in una vera e propria architettura autonoma, nella quale una figurazione spesso molto realistica richiama personaggi dell'Antico e del Nuovo Testamento o dell'antichità classica (profeti, re, tiranni, santi) associati nell'immaginario collettivo con la drammatica ineluttabilità del fluire irreversibile del tempo.
25. Ricordiamo che l'acciaio (che dal punto di vista funzionale sarebbe stato altrettanto adatto per molte parti degli orologi) non era che un sottoprodotto della lavorazione del ferro, molto costoso, troppo duro (a quei tempi) per lavorazioni raffinate. Fino al tardo '500 l'acciaio era impiegato quasi esclusivamente per strumenti affilati da taglio: spade, coltelli, rasoi, strumenti chirurgici.
26. La tradizione vuole che il primo orologio "da tasca" sia stato costruito all'inizio del Cinquecento dall'orologiaio Peter Henlein di Norimberga, antico centro della lavorazione di metalli e della produzione di strumenti di vario tipo, nonché sede di attività commerciali e finanziarie. Più probabilmente l'orologio da tasca fu il risultato di una transizione dai modelli da camera realizzatasi in parecchi luoghi più o meno contemporaneamente negli ultimi anni del '400.
27. Un bravo costruttore di orologi da tasca poteva fare, e in effetti faceva, anche orologi di grandi dimensioni, ma in generale non valeva il contrario.
28. Ciascuna località, però, continuò a servirsi dal suo "tempo effettivo" determinato dal transito del Sole al meridiano. Con la nascita delle ferrovie, nell'Ottocento, un traffico molto più veloce e più denso impose la definizione di zone orarie regionali e nazionali, ma solo nel 1884 gli accordi internazionali di Washington, con la determinazione dei fusi orari, ricondussero il tutto a un sistema globale.
29. Il programma cartografico di Kassel consisteva nel misurare e annotare le due coordinate sferiche con le quali, a partire dal tardo Trecento, gli astronomi usavano definire la posizione delle stelle: la *declinazione*, cioè l'elevazione di una stella al di sopra dell'equatore celeste e l'*ascensione verticale*, cioè l'angolo misurato in base al tempo trascorso tra il passaggio della stella al meridiano e il passaggio del Sole o di un altro astro di riferimento. (Corrispondono rispettivamente alla latitudine e alla longitudine di un punto sulla superficie della Terra). La declinazione era valutata con un astrolabio o con sestanti a base equatoriale; l'ascensione verticale doveva essere misurata con orologi. Gli orologi meccanici usati in questo campo erano privi di quadrante (la lancetta dei minuti sarebbe

stata troppo imprecisa): il tempo veniva misurato contando il numero di denti della ruota oraria (quella mossa direttamente dal tamburo dei pesi) che erano passati oltre un traguardo a partire dall'inizio dell'osservazione. A questo scopo tale ruota era di solito molto più grande che nei normali orologi, e portava intagliato un grande numero di denti. Tycho Brahe per esempio usava una ruota di oltre un metro di diametro e con più di mille denti, ma non realizzò mai risultati tali da lasciarlo appagato (in sette anni di osservazioni fa menzione di minuti soltanto due volte nei suoi diari).

30. Nel Quattro e Cinquecento, per valutare la velocità della nave veniva lanciato in acqua un galleggiante a prua e si osservava quanto impiegava per arrivare a poppa facendo uso di parametri convenzionali molto aleatori (quali, ad esempio, la durata di un'Ave Maria!). Dal Seicento si diffuse l'uso del solcometro: una sagola era divisa in nodi distanti l'uno dall'altro circa 14 metri e mezzo (precisamente 14.62 metri) e cioè la 120^a parte di un miglio. (a sua volta definito come la lunghezza di un tratto di meridiano corrispondente a un minuto d'arco: 1850 metri). La sagola, avvolta su un rullo era collegata con un'estremità a un galleggiante munito di zavorra che veniva lanciato in mare da poppa. Mentre la nave si allontanava, il galleggiante srotolava la sagola e si valutava la velocità contando quanti nodi passavano fuori bordo durante lo svuotamento di una clessidra da 30 secondi (120^a parte dell'ora).

La misura era imprecisa per una quantità di fattori quali la presenza di correnti, l'azione del vento, il trascinarsi del galleggiante, ecc., tuttavia l'uso del solcometro a sagola durò fino all'800, al punto che la stessa velocità delle navi venne espressa (come, del resto, accade tutt'ora) in *nodi*, corrispondenti a miglia all'ora.

31. In realtà, agli astronomi era noto un metodo per la misura della longitudine basato sull'osservazione delle eclissi.

In occasione di un'eclisse di Luna o di Sole, infatti, la differenza tra l'ora dell'evento astronomico misurata su una nave in esplorazione e l'ora dello stesso evento misurata in una città europea di riferimento avrebbe potuto essere utilizzata per risalire alla longitudine della nave. (Per fare un esempio, se l'inizio di un'eclisse di Luna fosse stato osservato alla 10^a ora dopo il mezzogiorno locale di Lisbona mentre la stessa eclisse fosse iniziata alla 13^a ora dopo il transito del Sole al meridiano di una località sulla costa del Brasile (cioè dopo 13 ore dal mezzogiorno locale) la longitudine del sito brasiliano sarebbe stata di 45 gradi ovest rispetto a Lisbona). La misura comportava la messa in funzione di un orologio calibrato sul transito del Sole al meridiano: una clessidra, un orologio a scappamento meccanico o una meridiana. Si trattava, però, di un metodo che non

poteva essere applicato in modo sistematico da tutte le spedizioni e per tutto il periodo del viaggio di esplorazione. (Le eclissi sono rare, quelle di Sole sono visibili solo da zone particolari della superficie terrestre, ecc.).

Dopo la diffusione del cannocchiale, a partire dai primi decenni del '600, fu possibile ricorrere all'osservazione delle fasi dei satelliti di Giove, utilizzando per esempio l'occultazione di uno di essi, osservabile da più punti della superficie terrestre. Anche questo metodo, tuttavia, ebbe un valore più teorico che reale nella pratica della navigazione e della cartografia. (Tra le varie ragioni, non ultima l'ignoranza in materia di astronomia e di matematica dei capitani delle navi, per lo più provenienti dagli stessi equipaggi per anzianità di servizio e capacità di condottieri e quindi spinti alla pericolosa avventura della navigazione negli oceani sconosciuti appena scoperti, da sete di denaro e di ricchezze.)

Soltanto nella seconda metà del Settecento questi metodi astronomici vennero utilizzati per misure accurate della longitudine, nel corso di spedizioni di scoperta cui erano affidati però anche seri e approfonditi programmi scientifici, come, per esempio, i viaggi compiuti dal celebre Capitano Cook.

32. Caso molto raro ai suoi tempi, Verazzano era ricco di cultura umanistica oltre che valente uomo di mare. Nel suo resoconto a Francesco I, così cita il suo tentativo di risolvere il problema dell'“invenzione della longitudine” (questa era l'espressione corrente) mediante l'uso di un misuratore del tempo: “*Questa distanza a noi fu nota per la longitudine, con vari strumenti navigando, senza eclissi lunari o altro aspecto, per moto solare, pigliando sempre la elevazione, a qual si voglia ora, per la differenza faceva da l'uno a l'altro orizzonte, correndo la nave geometriche ne era noto lo intervallo da uno meridiano a l'altro*”. “Abbiamo calcolato questa distanza misurando la longitudine non attraverso l'osservazione delle eclissi lunari o di altri fenomeni astronomici [occultazioni di stelle da parte della Luna o eclissi solari] ma mediante il rilevamento dell'ora di massima altezza del Sole (culminazione) e dell'intervallo di tempo tra un rilevamento e l'altro: potevamo così calcolare matematicamente (*geometriche*) lo spazio intercorrente tra i vari meridiani”.

In altre parole, spostandosi la nave, per esempio, verso ovest, l'intervallo tra due culminazioni successive risulta maggiore di 24 ore: poiché la Terra ruota di un grado in quattro minuti, una differenza per esempio di otto minuti in più rispetto alle 24 ore, corrisponde a una navigazione di due gradi nella longitudine (circa 200 km percorsi in una giornata lungo l'equatore).

33. Quando, nei suoi studi sulla caduta dei gravi, Galileo si risolve a riferire

al tempo il moto di una sfera lungo un piano inclinato, per misurare il tempo di caduta ricorre a una bilancia (lo strumento in assoluto più preciso di cui poteva disporre). Il metodo è descritto minutamente dallo stesso Galileo: dal fondo di un capace recipiente pieno d'acqua esce un sottile getto la cui portata (grazie all'ampiezza del vaso) può ritenersi costante. Nell'istante in cui la sfera inizia il suo movimento di caduta, il getto d'acqua viene intercettato con un piccolo recipiente che viene tolto al momento in cui il grave urta un campanello disposto, lungo la guida inclinata, a una certa distanza dal punto di partenza.

Ripetendo l'esperienza per diversi valori della lunghezza del percorso e pesando ogni volta le diverse quantità di acqua raccolta, Galileo giunge a determinare la relazione tra lo spazio percorso e il tempo impiegato a percorrerlo.

Galileo usa dunque la logica degli orologi ad acqua, raffinandola con l'impiego della bilancia. Un impiego analogo della bilancia per "pesare il tempo" è stato documentato dalla recente storiografia in periodi molto antichi della storia della misura del tempo, in particolare ne parla lo stesso Gerberto. (Vedi la nota 18).

34. E' noto che una cicloide è la curva descritta da un punto di una circonferenza che rotola senza strisciare su una retta. La cicloide gode della proprietà che una sua evolvente è una cicloide identica a quella di base. Ricordando che per evolvente di un profilo si definisce la curva descritta da un punto di una retta che rotola sul profilo senza strisciare, si riconosce che la massa appesa ai fili del pendolo di Huygens descrive proprio un'evolvente del profilo perché, sotto l'effetto della gravità, essa tende tratti di filo libero di lunghezza via via maggiore imponendo distacchi dalla guida secondo la tangente. Poiché i profili delle guide sono archi di cicloide, anche la traiettoria della massa è un arco di cicloide. L'isocronismo di un pendolo cicloidale implica anche che la cicloide è una curva tautocrona (dal greco *thautos*, lo stesso, e *chronos*, tempo) cioè che un punto materiale che incominci il movimento in *qualunque* punto di una guida cicloidale sotto l'azione della sola forza di gravità, raggiunge il punto più basso dell'arco nello stesso tempo. Questo tempo è, inoltre, il minimo rispetto al tempo impiegato lungo qualunque altro profilo che congiunga il punto di partenza con quello di arrivo.
35. In questa circostanza, in effetti, Huygens mostra un atteggiamento che si ripeterà più volte nella sua attività e che – già presente in Galileo – sarà comune a molti altri pensatori e scienziati del Sei e Settecento, cioè un intreccio profondo tra l'interesse ad applicarsi a problemi concreti e la capacità di sviluppare procedimenti e approcci teorici e astratti. In questo diffuso clima culturale, la corsa alla realizzazione di orologi

sempre più precisi giocò un ruolo rilevante, beneficiando di potenzialità speculative squisitamente scientifiche e stimolando a sua volta, sul piano tecnologico, sviluppi teorici di meccanica e di matematica e ricerche di scienza dei materiali.

36. Espressa in funzione della sequenza dei giorni dell'anno, tale differenza (chiamata *equazione del tempo*) risulta dalla somma di due funzioni sinusoidali, una di periodo annuale e l'altra di periodo semestrale, con un anticipo massimo di circa 16 minuti cui segue un ritardo massimo relativo di 4 minuti, un anticipo massimo relativo di 5 minuti e, infine, un ritardo massimo di 15 minuti. In quattro giorni dell'anno il mezzogiorno del tempo medio coincide con la culminazione del Sole. (Le date in cui cadono massimi, minimi e coincidenze presentano una deriva secolare dovuta alla precessione).
37. Vista col senno di poi, questa fase dell'arte dell'orologeria appare come un vicolo cieco da cui gli orologiai non riuscivano a venir fuori proprio per i grandi successi ottenuti dal pendolo (ahimé, però, solo in terraferma!). La vanità di tanti sforzi appariva anche più deludente a fronte di un vero e proprio pullulare di premi e ricompense offerti da principi, ammiragliati, governi a chi avesse realizzato un orologio marino affidabile. La prima di queste ricompense (più di 10000 ducati) fu stabilita nel 1598 dal Re di Spagna Filippo III dopo la tempesta che distrusse sugli scogli dell'Irlanda l'*Invencible Armada*, la più gigantesca flotta dell'epoca, ritenendo (indubbiamente a torto) che un buon misuratore di longitudine avrebbe evitato il disastro. Nel corso del '600 olandesi, francesi e inglesi misero in palio premi altrettanto ricchi. La più importante, però, fu la ricompensa offerta dal Parlamento inglese nel 1714 sia per la sua notorietà sia per l'ammontare della somma : 200 sterline (oltre 10 miliardi di lire attuali) a chi avesse costruito un orologio capace di non sbagliare di più di due minuti dopo un viaggio dalla Gran Bretagna alla Giamaica, cioè con uno scarto corrispondente a un errore in longitudine minore di mezzo grado.
38. Robert Hooke fu tra le personalità scientifiche di primo piano del XVII secolo. Studioso di meccanica e matematica, di astronomia, di ottica, di termologia, fu l'autore di un centinaio di invenzioni (tra le quali uno dei primi microscopi a due lenti). Membro della Royal Society, si deve alle sue insistenze se Newton si risolse a pubblicare i suoi *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, "tenuti nel cassetto" per moltissimi anni.

Affascinato dalla cronometria, si interessò di una vasta gamma di problemi, dagli scappamenti ai regolatori, agli utensili e alle macchine per

automatizzare il taglio delle ruote dentate. Sua, probabilmente, è la prima realizzazione dello scappamento ad ancora e, qualche tempo dopo, del bilanciere con molla a spirale. (Non a caso, tra i suoi interessi si annovera lo studio del comportamento elastico dei metalli e sua è la definizione della legge di proporzionalità *ut tensio sic vis* che porta ancora il suo nome.) Tuttavia Hooke (come per altre sue scoperte) si rivelò prima di tutto interessato a ottenere profitti e, come il peggior nemico di se stesso, circondò di segretezza questa sua invenzione con l'intento di brevettarla solo quando fosse stata perfetta. Quando seppe dell'orologio a bilanciere di Huygens, non gli restò che rivendicare il primato mostrando in giro un orologio a molla costruito anni prima sulla base di un suo progetto dal grande orologiaio londinese Thomas Tompion.

39. Il *Board of Longitude* che giudicava gli esiti delle prove affidò la costruzione di copie del quarto strumento di Harrison a valenti orologiai londinesi per verificare la riproducibilità dello strumento e della sua precisione, ricavandone esiti deludenti perché le copie risultarono troppo costose per ipotizzare una loro diffusione nella Marina Britannica. (È curioso il fatto che una di tali copie fosse affidata al Capitano Bligh sul *Bounty*: sequestrata durante l'ammutinamento del 1789, tornò in Inghilterra solo nel 1843.)

Soltanto nell'Ottocento l'orologeria inglese fu in grado di fornire ai capitani dei vascelli militari cronometri capaci di prestazioni paragonabili a quelle degli strumenti di Harrison. (Una cosa analoga si verificò sulle navi di Napoleone). Grazie a questa disponibilità di cronometri di alte prestazioni la campagna dei rilevamenti topografici delle coste americane e delle terre disseminate nella vastità del Pacifico (inclusa l'Australia, di recente scoperta) riprese con rinnovato vigore dopo il definitivo tramonto del pericolo napoleonico. Può essere interessante ricordare, al proposito, che lo stesso giovane Darwin poté compiere quel viaggio (l'unico) che gli aprirà lo spirito e la mente all'idea di evoluzione perché ospite della seconda spedizione di rilevamento della longitudine che la nave militare *Beagle* effettuò dal 1832 al 1836 al comando del Capitano Fitzroy. Ed è proprio Darwin a riferire, nel suo affascinante "*Viaggio di un naturalista intorno al mondo*", che il "cuore" dell'impresa, la zona della nave custodita con una cura quasi religiosa era un locale in cui erano riposti ben 64 cronometri, scrupolosamente tenuti carichi e in perfetta efficienza da un ufficiale addetto esclusivamente alla loro cura. (Un numero così grande di strumenti caratterizzava questo tipo di spedizioni ed era un modo per ovviare a eventuali danni a questo o quell'esemplare nel corso di anni di navigazione e nello stesso tempo consentiva un controllo della affidabilità delle indicazioni cronometriche e la valutazione di valori medi).

Estensioni e approfondimenti sulla misura del tempo si possono trovare, per esempio, in:

L. Briatore, *Le misure del tempo*, Marzorati, Milano, 1972.

A.A. V.V., *Museo d'Arti applicate: strumenti scientifici, orologi*, Electa Editore, Milano, 1983.

D. S. Landes, *Storia del tempo*, Mondadori Editore, Milano, 1984.

R. J. Rohr, *Meridiane*, Ulissedizioni, Torino, 1988.