

EDOARDO PROVERBIO

GALILEO E IL PROBLEMA DELLA MISURA  
DEL TEMPO

*Estratto da*

NOVITÀ CELESTI E CRISI DEL SAPERE  
ATTI DEL CONVEGNO INTERNAZIONALE DI STUDI GALILEIANI

Supplemento agli  
*Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza*  
Anno 1983 - Fascicolo 2

---

EDOARDO PROVERBIO

## GALILEO E IL PROBLEMA DELLA MISURA DEL TEMPO

### 1) *Il problema della misura del tempo all'epoca di Galileo*

Nel corso del secolo XVI si realizzò, come risulta dalla documentazione esistente, una vera e propria rivoluzione nelle tecniche e nelle tecnologie delle osservazioni astronomiche<sup>1</sup>. A seguito di questa rapida evoluzione la precisione delle osservazioni dei corpi celesti stellari e planetari migliorò di circa un ordine di grandezza passando da circa 5 primi d'arco all'inizio del secolo con le osservazioni di Bernard Walther a circa 20-50 secondi d'arco nelle osservazioni di Ticho Brahe. Questa notevole precisione nelle misure astronomiche non subì sensibili miglioramenti nel corso del secolo XVII e solo sul finire del 1600 a seguito di nuovi e sensibili miglioramenti negli strumenti di osservazione<sup>2</sup> e nelle tecniche di osservazione con l'introduzione del reticolo e del micrometro filare<sup>3</sup> si ebbe un ulteriore balzo in avanti dell'astronomia di posizione (fig. 1). Questo balzo in avanti non avrebbe tuttavia avuto luogo se non fosse stato accompagnato da un parallelo eccezionale sviluppo degli strumenti e delle tecniche per la misura e la conservazione del tempo.

A partire dalla fine del XIII secolo, epoca in cui apparvero i primi orologi meccanici a ruote dotati di scappamento a verga con bilanciere a barra dritta (*à foliot*) o circolare, questo tipo di scappamento venne impiegato nella misura del tempo negli orologi da torre e d'interno. Solo a partire dalla fine del XV secolo tuttavia questi orologi entrarono nella pratica delle osservazioni astronomiche. Il primo ad usare un tale strumento per la determinazione delle coordinate di corpi celesti sembra essere stato Bernard Walther nel 1484<sup>4</sup>, i cui meriti nella rinascita dell'astronomia sono stati riconosciuti solo recentemente<sup>5</sup>. Successivamente nel corso del XVI secolo Michele Maestlin<sup>6</sup>, Guglielmo IV d'Assia e Ticho Brahe fecero sicuramente uso di orologi meccanici ma senza particolare successo<sup>7</sup>. Sfortunatamente, come è già stato osservato<sup>8</sup>, esistono scarsissime informazioni non solo sulla precisione degli strumenti e sugli orologi utilizzati nel corso del XVI e

---

<sup>1</sup> E. PROVERBIO, *Strumenti di osservazione e misura del tempo nel secolo XVI*, Atti del Primo Seminario di Storia dell'Astronomia, Pisa (in stampa).

<sup>2</sup> Un contributo fondamentale all'evoluzione dell'astronomia di posizione è stato dato da Olaus Roemer (1644-1710) a cui è attribuita l'invenzione dello «strumento dei passaggi» a cannocchiale dritto (1684) e che ideò e realizzò, rispettivamente nel 1690 e nel 1704, lo «strumento altazimutale» ed il prototipo dei moderni «cerchi meridiani».

<sup>3</sup> L'invenzione del «reticolo» sembra doversi attribuire ad Eustachio Divini (1649), mentre a Giammarino Montanari spetta il merito di aver introdotto il «micrometro filare» dotato di fili mobili (1662).

<sup>4</sup> La notizia è data da G. DELAMBRE in *Histoire de l'astronomie moderne*, Paris 1821, I, p. 399.

<sup>5</sup> Si veda l'articolo di R.R. KREMER, *Bernard Walther's Astronomical Observations*, «Journal of History of Astronomy», XI (1980), p. 174.

<sup>6</sup> Descritto in MAESTLIN, *Consideratio & Observatio cometarum aetherei astronomica*, Heidelberg 1581, p. 16.

<sup>7</sup> F. BERTHOUD, *Historie de la mesure du temps*, Paris 1802, p. 58.

<sup>8</sup> Sul problema delle scarse informazioni attualmente disponibili sulla funzione degli strumenti e sulle tecniche astronomiche nel corso del XV e XVI secolo si veda: E. POULLE, *L'astronomie du Moyen Age et ses instruments*, «Annali dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze», VI (1981), fasc. 1, p. 3; e E. PROVERBIO, *Strumenti di osservazione*, cit.

XVII secolo ma anche sul tipo e sulle tecniche impiegate nella misura del tempo. Ciò rende particolarmente arduo il problema di definire il reale contributo dell'orologio meccanico al progresso dell'astronomia, della navigazione e delle ricerche sul moto, poiché questi erano i grandi problemi che si ponevano con forza all'attenzione degli scienziati nel corso del XVI e XVII secolo. In uno dei manoscritti delle osservazioni effettuate dal Maestlin preservato nella Biblioteca Nazionale di Vienna, è descritto l'esperimento condotto dallo stesso Maestlin per determinare il diametro del Sole dalla misura del tempo di passaggio del disco solare rispetto ad un riferimento fisso, utilizzando un orologio meccanico<sup>9</sup>. Poiché il diametro apparente del Sole ricavato in tal modo differisce dal valore attualmente adottato di soli 9 secondi d'arco<sup>10</sup>, se si attribuisce tale differenza al *solo* errore di marcia dell'orologio utilizzato si ha che tale errore ammonta a circa 7<sup>m</sup>. La vera accuratezza dell'orologio usato dal Maestlin doveva perciò essere senz'altro inferiore a tale errore ed al più dell'ordine di 2-3 minuti di tempo. Anche Guglielmo d'Assia fece uso di orologi meccanici almeno a partire dal 1585 come riferisce il suo aiutante Rothmann<sup>11</sup> e come afferma lo stesso Guglielmo in una lettera a Ticho parlando di uno «orologio a secondi», che presentava una marcia diurna inferiore al minuto<sup>12</sup>. Si doveva evidentemente trattare di uno degli orologi costruito da Jost Bürgi con scappamento a verga a oscillazioni incrociate, munito cioè di due bilancieri a barra indipendenti e tra di loro perpendicolari.

Infine anche Ticho Brahe utilizzò un certo numero di orologi meccanici in grado di indicare i minuti e, a partire dal 1581 con l'indicazione anche dei secondi. La precisione di tali orologi era tuttavia assai modesta, dell'ordine di uno o due minuti primi come asserisce lo stesso Ticho Brahe<sup>13</sup>.

La precisione riferita alle 24 ore degli orologi meccanici impiegati nelle osservazioni si aggirava quindi agli inizi del XVII secolo attorno al minuto di tempo e cioè, espressa in angolo orario, in 15 primi d'arco, mentre la determinazione astronomica del tempo, basata sull'osservazione del passaggio del Sole in meridiano o sulla misura dell'altezza e dell'azimut del Sole e delle stelle, tramite la Luna o il pianeta Venere, rispettivamente durante il giorno e durante la notte, veniva oramai effettuata con una precisione da 10 a 20 volte maggiore.

È questo il motivo delle continue lamentele degli astronomi del XVI e, come vedremo, anche del XVII secolo, sull'inadeguatezza degli orologi meccanici impiegati nelle osservazioni astronomiche, chiaramente espresse nelle parole di Ticho Brahe, il quale afferma che «benché, sia l'illustrissimo principe (Guglielmo d'Assia), sia io abbiamo messo ogni impegno nel tentativo di costruire orologi della massima precisione, capaci di indicare non solo le ore, ma anche i minuti primi e secondi in modo costante, tuttavia, essi per molte ragioni non riescono ad essere esatti, né a coincidere con le leggi del cielo in qualsiasi momento e con andamento durevolmente uniforme, come sarebbe necessario in una ricerca di tale sottigliezza»<sup>14</sup>.

Non è quindi strano constatare che, almeno fino alla metà del XVII secolo, gli strumenti forse più affidabili per la loro uniformità per la misura di intervalli di tempi anche lunghi nelle osservazioni astronomiche, nelle misure di laboratorio e nella navigazione apparissero le clessidre ad acqua ed a sabbia<sup>15</sup>.

<sup>9</sup> Oesterreichische National Bibliothek, Vienna, Cod. Vindob. 10,887, Dec. 1579, 5-6 Dec. 1577 e 15 Jan. 1578.

<sup>10</sup> R.A. JARREL, *Maestlins place in Astronomy*, «Physis», XVII (1975), p. 5.

<sup>11</sup> E. ZINNER, *Astronomische Instrumente des 11 bis 18 Jabrunderts* (1979), p. 22.

<sup>12</sup> TYCHONIS BRAHE DANI *Opera Omnia*, Copenhagen 1913-29, VI, p. 51.

<sup>13</sup> TYCHONIS BRAHE *Astronomicae Instauratae Progymnasmata*, Pragae 1602-05, II, p. 428.

<sup>14</sup> *Ibid.*, I, p. 148.

<sup>15</sup> Sembra accertato che uno dei primi orologi meccanici per la navigazione venne impiegato da Willem Barentsz nel 1596 nella ricerca del passaggio Nord-Est. Si veda: E. MORPURGO, *È difficile datare un orologio antico*, «La Clessidra», 1959, 2, p. 23.

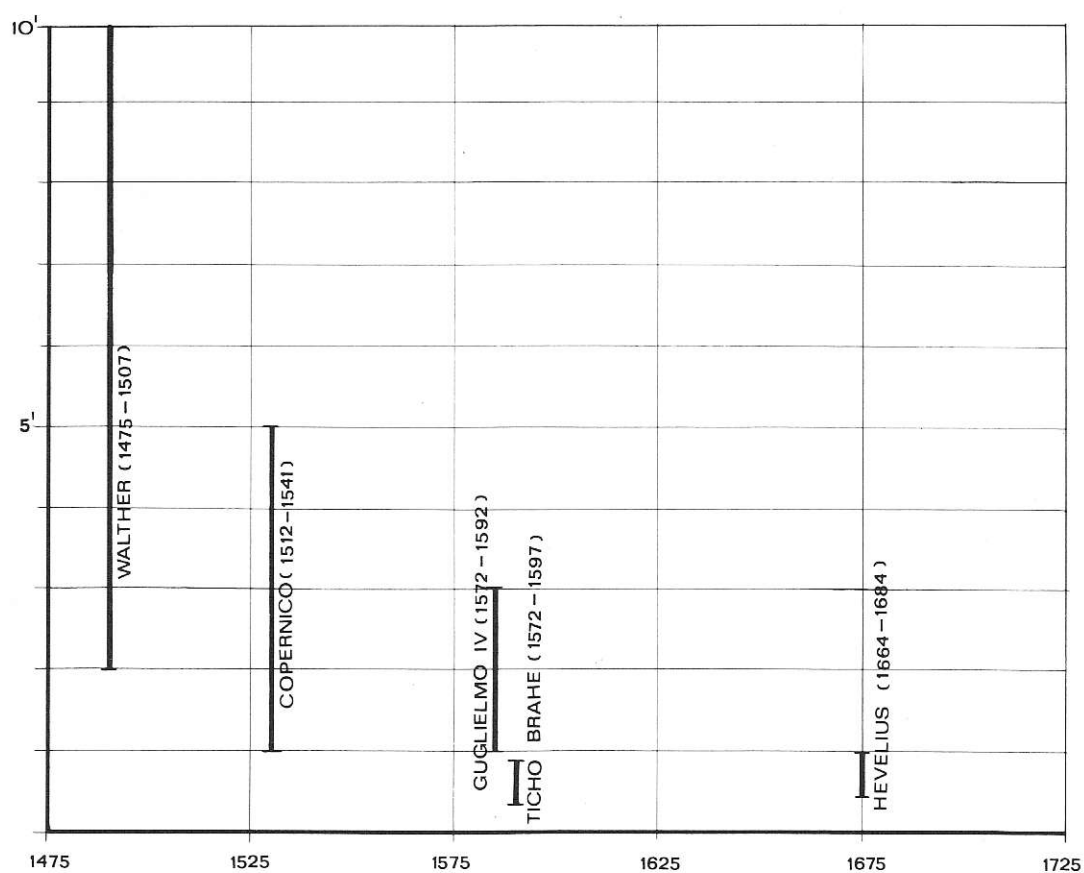


Fig. 1.\* Intervallo medio della precisione nelle osservazioni stellari, planetarie e del Sole effettuate nel corso di circa due secoli (in ordinata). A seguito della rivoluzione delle tecniche astronomiche avvenuta durante il XVI secolo si ebbe un miglioramento di circa un ordine di grandezza nella precisione delle osservazioni astronomiche, che rimase pressoché invariata nel corso del XVII secolo.

Sono noti i tentativi di Ticho Brahe di migliorare attorno al 1587 le prestazioni di questi misuratori di intervalli facendo uso di piombo calcinato e ben depurato ridotto a polvere finissima<sup>16</sup>.

Circa un secolo dopo, sorprendentemente, lo stesso Vincenzo Viviani che rivestì un ruolo fondamentale nella documentazione e nella difesa delle priorità di Galileo nell'applicazione del pendolo agli orologi meccanici affermava, a proposito delle prestazioni della clessidra nella misura del tempo, «ch'ella sarà inalterabile per quanto durerà la sua saldezza, né averà alcun bisogno di essere rivista o rassetta come segue d'ogn'altra invenzione d'orivuolo»<sup>17</sup>.

L'importanza ed il ruolo svolto ancora nel XVII secolo dalla clessidra ad acqua ed a sabbia è d'altra parte confermato dalla pubblicazione di testi che descrivono e propongono l'impiego di sempre nuovi tipi di questi orologi cosiddetti muti<sup>18</sup>.

## 2) Il contributo di Galileo al problema della misura del tempo

Appare chiaro da quanto detto che il problema di disporre di strumenti atti alla misura degli intervalli e degli istanti di tempo si poneva sulla fine del XVI ed agli inizi del XVII secolo come un problema urgente all'attenzione degli uomini di scienza.

Fino a che punto Galileo fu veramente consapevole di questo problema e della necessità di un radicale miglioramento negli strumenti e nelle tecniche di misura del tempo allora impiegati è un quesito a mio avviso di grande interesse e che pone sotto una luce diversa anche il problema della priorità di Galileo sulla scoperta delle leggi del pendolo e dell'applicazione del pendolo all'orologio.

Credo che dopo la documentazione fornita a suo tempo da Antonio Favaro<sup>19</sup> e di quella successiva data da Drummond Robertson<sup>20</sup> e le recenti altrettanto documentate considerazioni sviluppate da E. Morpurgo<sup>21</sup> e da Silvio E. Bedini<sup>22</sup>, ci sia ben poco spazio per contestare il contributo e la priorità di Galileo nella scoperta della legge sull'isocronismo e dell'applicazione del pendolo all'orologio. Fondamentalmente questa ampia documentazione è basata, come è noto, sulle testimonianze scritte di Vincenzo Viviani<sup>23</sup>, del Principe Leopoldo e di altri corrispondenti, oltretutto sugli scritti di Galileo. Ci sembra tuttavia che osservando questi problemi in un ambito più ampio, nei loro rapporti con la situazione generale *esterna*, con il clima culturale e con le

<sup>16</sup> TYCHONIS BRAHE *Progygnasmata*, cit., p. 149.

<sup>17</sup> V. VIVIANI, *Trattato della clessidra*, presentato da M. L. BONELLI in «La Clessidra», 1958, 3, p. 16.

<sup>18</sup> Uno dei trattati più noti sull'uso delle clessidre pubblicato nel XVII sec. è quello scritto da D. MARTINELLI, *Horologi elementari*, Venetia 1669. Altro testo assai noto quello di A. M. RADI, *Nuova Scienza di Horologi a polvere*, Roma 1665.

<sup>19</sup> Della imponente produzione di A. Favaro sulla scoperta dell'isocronismo e sulla applicazione del pendolo all'orologio citiamo qui gli scritti più significativi: *Galileo Galilei e Cristiano Huygens. Nuovi documenti sull'applicazione del pendolo all'orologio*, «Memorie del R. Istituto Veneto di Scienze e Lettere», XXIV (1891), p. 389; *Per la storia delle prime osservazioni fatti da Galileo sul pendolo e dell'applicazione di esso all'orologio*, «Atti e memorie della R. Accademia di Scienze, Lettere ed Arti di Padova», XXIX (1908), p. 14; *Galileo oppure Huygens?*, *ibid.*, XXX (1914), p. 61; *Intorno al modello Galileiano dell'orologio a pendolo*, *ibid.*, XXXVI (1920), p. 13.

<sup>20</sup> J. DRUMMOND ROBERTSON, *The evolution of clockwork*, Londra, Cassel & Company 1972.

<sup>21</sup> E. MORPURGO, *L'Orologio a pendolo*, Roma, La Clessidra 1957.

<sup>22</sup> S.A. BEDINI, *Galileo Galilei and Time Measurement*, «Physis», V (1963), 2, p. 145.

<sup>23</sup> Le informazioni relative alla scoperta dell'isocronismo ed all'applicazione del pendolo all'orologio da parte di Galileo sono contenute nel *Racconto storico della vita di Galileo* steso da Viviani su richiesta del Principe Leopoldo de' Medici in data 29 aprile 1654, e nella *Lettera di V. Viviani al Principe Leopoldo de' Medici intorno all'applicazione del pendolo all'orologio* scritta il 20 agosto 1659. Esistono tuttavia altri tre documenti, a mio avviso di grande interesse, riportati il primo in A. FAVARO, *Galileo Galilei e Cristiano Huygens*, cit. p. 407; gli altri due in A. FAVARO, *Per la storia delle prime osservazioni*, cit., p. 15. Il primo documento sembra risalire al 1682, il terzo al 1684 (per quest'ultimo si veda anche: V. VIVIANI, *Trattato delle clessidre*, cit., p. 20), del secondo documento non è dato sapere la data.

esigenze del mondo scientifico, che lo stesso Galileo ha vissuto intensamente, si possono trarre ulteriori considerazioni che ci permettono di capire meglio il contributo di Galileo ai problemi della cronometria del XVII secolo. Sotto questa luce una rilettura dei documenti galileiani sembra aprire nuovi spiragli.

Il contributo di Galileo alla cronometria teorica appare infatti strettamente connesso ai problemi che la cronometria pratica ed applicata poneva pressantemente, come si è visto, a partire dall'ultimo quarto del XVI secolo, ed è a questi problemi che Galileo sembra sia stato particolarmente sensibile.

Se attorno agli anni 1583 Galileo sembra aver intuito, come afferma il Viviani, la legge dell'isocronismo del pendolo<sup>24</sup>, non vi è dubbio che tale intuizione fosse allora legata in qualche modo all'esperienza degli studi di medicina a cui Galileo attendeva in quegli anni ed in particolare al problema della misura della frequenza dei battiti del polso, come è attestato nei documenti lasciati dallo stesso Viviani<sup>25</sup>.

Attorno agli anni 1590 l'attenzione di Galileo è invece ormai prevalentemente rivolta ai problemi del moto ed è da questa data che si è posta certamente a Galileo l'esigenza di disporre di un metodo preciso per la misura del moto dei gravi ed in particolare per la misura del periodo del pendolo. A partire dal 1602, data accertata dalla lettera di Galileo a Guidobaldo del Monte<sup>26</sup> in cui lo stesso Galileo affermò: «Persisto in voler persuaderle vera la proposizione dei moti fatti in tempi uguali nella medesima quarta di cerchio»; e fino alla stesura del *Dialogo dei massimi sistemi*, composto dal 1624 al 1632, in cui è contenuta la legge del periodo del pendolo<sup>27</sup>, gli unici due riferimenti di Galileo alla legge di oscillazione del pendolo sono dati nello stesso *Dialogo* nella II e IV giornata<sup>28</sup>. È interessante osservare, che in ambedue i casi Galileo, si mostra consapevole del fatto che «le reciprocazioni» del pendolo «siano quelle lunghissime o brevissime» si presentano «insensibilmente differenti», come «l'esperienza vi può mostrare».

Sembra dunque potersi affermare che Galileo, almeno fino al 1632, fosse dell'avviso, sulla base dell'esperienza, che le oscillazioni del pendolo non fossero rigorosamente isocrone. Una conferma di ciò è data sia nei *Saggi* dell'Accademia del Cimento in cui è detto che Galileo fino dal 1583 avvertisse «non tutte le oscillazioni del pendolo correre in tempi uguali, e quelle che di mano in mano s'accostano alla quiete spedirsi in più breve tempo che non fanno le prime»<sup>29</sup>, sia nel documento senza data redatto dal Viviani in cui si afferma che Galileo, a proposito delle vibrazioni «strette» e «larghe» del «pendolo» se «il numero di queste eccedeva di qualcosa il numero di quelle (il che però si fa sensibile solamente dopo un numero grandissimo dell'una o delle altre) attribuiva questa maggioranza al minimo ostacolo che arreca l'aria al mobile più tardi»<sup>30</sup>.

Successivamente, a partire dai *Discorsi su due nuove scienze* (1633-34), Galileo fa riferimento

<sup>24</sup> Cfr. nota 23.

<sup>25</sup> Nel cit. *Racconto storico*, il Viviani, dopo aver accennato alle osservazioni di Galileo del moto di una lampada nel Duomo di Pisa, afferma che lo stesso «si accertò dell'uguaglianza delle sue vibrazioni, e per allora sovviennegli di adattarla all'uso della medicina per la misura della frequenza dei polsi». Nella narrazione dello stesso Viviani non datata riportata dal Favaro e cit., si dice ancora più esplicitamente, a proposito della scoperta dell'isocronismo che Galileo «pensò subito di applicarla ad uso giovevole della medicina (nella quale per assecondare il gusto del proprio padre faceva allora i suoi studi); onde li propose ai medici di quel tempo il valersi di un piccolo pendolo per esaminare con un tal giudice inalterabile e passionato, senza dover, come solevano, confidare nella propria e fallace reminescenza, la varietà della frequenza dei polsi dei febbricitanti».

<sup>26</sup> G. GALILEI, *Opere*, Firenze 1968, X, p. 97.

<sup>27</sup> *Ibid.*, VIII, p. 139. La legge del periodo del pendolo è enunciata da Galileo anche nel *Dialogo* (VII, p. 475) e nella lettera a L. Realio del 5 agosto 1637 (XVII, p. 102).

<sup>28</sup> *Ibid.*, VII, pp. 256 e 475.

<sup>29</sup> *Saggi di Naturali esperienze dell'Accademia del Cimento*, Firenze 1666, p. 20.

<sup>30</sup> Cfr. nota 23.

alla legge dell'isocronismo del pendolo in altre cinque circostanze senza più accennare al non perfetto isocronismo delle oscillazioni del pendolo.

L'apparente contraddizione può trovare, a mio avviso, una logica spiegazione nel fatto che pure giudicando Galileo che le oscillazioni del pendolo non fossero del tutto isocrone, ritenne, per almeno due ragioni, che fosse necessario difendere l'idea del perfetto isocronismo del pendolo stesso.

La prima di tale ragioni è una ragione teorica, essendo Galileo erroneamente convinto che il moto più veloce «è quello che si fa per l'arco del quale essa linea retta è corda»<sup>31</sup>. Non a caso infatti l'affermazione pura e semplice dell'isocronismo del pendolo si trova proprio nei *Discorsi* in cui Galileo sostiene la sua errata convinzione<sup>32</sup>.

La seconda ragione è invece di ordine pratico, ed è dovuta al crescente interesse di Galileo per le applicazioni del pendolo nella misura di intervalli di tempo nel corso delle osservazioni astronomiche ed in particolare per le osservazioni dei tempi di occultazione e di passaggio dei satelliti di Giove, e nella determinazione dei tempi di caduta dei gravi. Nelle lettere a Pietro Carcavy del 5 giugno 1637<sup>33</sup> ed a G.B. Baliani del 1° agosto 1639<sup>34</sup> Galileo propone infatti l'uso del pendolo come misuratore dei tempi di caduta dei gravi, mentre nel trattato sulle *Operazioni astronomiche*, scritto presumibilmente nel 1637, l'uso di un «misuratore del tempo» basato sulla costanza del periodo di oscillazione del pendolo «che senz'errore d'un momento ci somministra l'ore e le loro frazioni, fino a minuti primi, secondi e terzi, e più, se più bisognassero», viene esplicitamente invocato<sup>35</sup>.

È certo che, a partire dal 1610, sulla base della scoperta di un nuovo metodo per la determinazione della longitudine in mare basato sull'osservazione degli istanti delle occultazioni e dei passaggi dei satelliti di Giove da parte del disco e dell'ombra del pianeta, Galileo sia sempre stato stimolato alla ricerca di un misuratore di tempo o di un vero e proprio orologio in grado di fornire la necessaria precisione nelle osservazioni astronomiche. Se inizialmente, durante le trattative con il Re di Spagna nel 1612 e nel 1616, l'accento di Galileo è principalmente rivolto al problema del calcolo delle effemeridi dei satelliti di Giove, non vi è dubbio che successivamente la sua attenzione si sia concentrata proprio sul problema del «misuratore di tempo», che appare quasi in primo piano nelle successive, purtroppo infruttuose trattative svolte a partire dal 1636 con gli Stati Generali dell'Olanda<sup>36</sup>, come appare chiaramente dalla lettera che egli stesso inviò agli Stati Generali dei Paesi Bassi il 5 agosto 1636<sup>37</sup>. È nella lettera a Lorenzo Realio del 5 giugno 1637<sup>38</sup> che Galileo entra nel dettaglio della costruzione di un tale misuratore basato «non d'un peso pendente da un filo, ma di un pendolo di materia solida e grave, qual sarebbe ottone o rame; il qual pendolo fu in forma di settore di cerchio di dodici o quindici gradi». Galileo in tale occasione suggerisce, come è noto, anche un meccanismo per contare le oscillazioni, e aggiunge che «siccome la fallaccia degli orologi consiste principalmente nel non s'essere sin qui potuto fabbricare quello che noi chiamiamo il tempo dell'orologio, tanto aggiustatamente che faccia le

<sup>31</sup> GALILEO, *Opere*, cit., VIII, p. 139.

<sup>32</sup> *Ibid.*, VIII, pp. 129 e 141.

<sup>33</sup> *Ibid.*, XVII, p. 91.

<sup>34</sup> *Ibid.*, XVIII, p. 76.

<sup>35</sup> *Ibid.*, VIII, p. 453.

<sup>36</sup> Sulle trattative condotte da Galileo per l'applicazione del suo metodo di determinazione della longitudine in mare si veda A. FAVARO, *Documenti inediti per la storia dei negoziati con la Spagna per la determinazione della longitudine in mare*, «Memorie del R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti», XXIV (1891), p. 101, e A. FAVARO, *Documenti inediti per la storia dei negoziati con gli Stati Generali d'Olanda per la determinazione delle longitudini*, *ibid.*, p. 289.

<sup>37</sup> GALILEO, *Opere*, cit., XIV, p. 463.

<sup>38</sup> *Ibid.*, XVII, p. 400.

sue vibrazioni eguali; così in questo mio pendolo semplicissimo, e non soggetto ad alterazione alcuna, si contiene il modo di mantenere sempre egualissime le misure del tempo». Galileo accenna ripetutamente nel periodo 1637-39 a questo «misuratore del tempo», come nelle *Operazioni astronomiche*<sup>39</sup> e nella lettera a G.B. Baliani del 1° settembre 1639<sup>40</sup>, e dà tutta una serie di indicazioni per la taratura di un tale misuratore, e cioè per la misura del periodo di oscillazione del pendolo, basandosi sulla misura delle oscillazioni contenute nell'intervallo tra due passaggi successivi di una stella rispetto ad un riferimento fisso<sup>41</sup>.

Può sembrare a questo punto strano che Galileo abbia ritenuto sia nella lettera a Pietro Carcavy del 5 giugno 1637 sia nella lettera a G.B. Baliani del 1° agosto del 1639, e cioè contemporaneamente e dopo la descrizione del suo «misuratore del tempo» di considerare che «più esatte misure» dei tempi di caduta dei gravi anziché col pendolo potessero essere effettuate coll'antico metodo babilonese della misura del flusso e della quantità di acqua gocciolante da un sottile cannello, metodo che egli aveva già indicato precedentemente all'epoca della stesura dei *Discorsi* per la misura dei tempi di caduta di una sfera lungo il piano inclinato<sup>42</sup>. Tanto più si resta meravigliati se si tiene conto che sulla base di misure realmente effettuate utilizzando tale metodo<sup>43</sup> si può facilmente calcolare che la precisione di un tale «misuratore» si aggira su 10-15 minuti di tempo sulle 24 ore, e quindi molto più scadente dei comuni orologi meccanici allora in uso.

Il fatto è che Galileo non solo non arrivò a realizzare il suo «misuratore di tempo» a cui attribuiva una precisione insolita, più di un ordine di grandezza migliore dei comuni orologi meccanici, e, presumibilmente anche degli orologi ad acqua ed a sabbia<sup>44</sup>, ma ha probabilmente realizzato solo parte delle esperienze sulla misura del periodo del pendolo a cui accenna nelle sue opere e nella corrispondenza.

Ciò non toglie che egli fosse ormai convinto non solo della necessità ma anche della possibilità di realizzare un «misuratore del tempo» o addirittura un orologio in qualche modo asservito al moto del pendolo, come mi sembra che possa apparire nella famosa lettera a Lorenzo Realio del 5 giugno 1637 in cui afferma, dopo di aver descritto il suo «misuratore del tempo»: «Ma il significar questo alle SS. Loro che hanno uomini esquisitissimi ed ingegnossissimi in fabbricare orologi ed altre macchine ammirande, è cosa superflua, perché essi medesimi sopra questo fondamento nuovo, di sapere che il pendolo, muovasi per grandi e per brevi spazi, fa le sue reciprocazioni egualissime, troveranno conseguenze più sottili di quelle che io possa immaginarmi»<sup>45</sup>.

D'altra parte Galileo sembra rendersi conto dell'utilità di questo strumento non solo nell'osservazione dei satelliti medicei e per la determinazione della longitudine ma anche in altre operazioni astronomiche, come egli aveva indicato nello scritto omonimo del 1637 e come ancora ricorda nella lettera a G.B. Baliani nel 1639, in cui afferma che «con l'uso del pendolo per misuratore del tempo» egli è in grado di trovare «precisioni infinitamente più esatte che quelle che si traggono da qualsivogliano strumenti astronomici, quando anco e quadranti e sestanti,

<sup>39</sup> *Ibid.*, VIII, p. 453.

<sup>40</sup> *Ibid.*, XVIII, p. 93.

<sup>41</sup> *Ibid.*, XVII, p. 91; VII, p. 454; XVIII, p. 76.

<sup>42</sup> *Ibid.*, VIII, p. 213.

<sup>43</sup> R. NAYLOR, *Galileo's simple pendulum*, «Physis», XIV (1974), 1, p. 23.

<sup>44</sup> È indicativa dell'entusiasmo con cui Galileo operava e del suo interesse per il problema della misura del tempo la frase che si trova nella lettera cit., indirizzata agli Stati Generali dei Paesi Bassi, del 15 agosto 1636: «circa il 4° requisito, io ho tal misuratore del tempo, che se si fabbricassero 4 o 6 di tali strumenti et si lasciassero scorrere, troveremmo (in confermazione della loro giustezza), che i tempi da quelli misurati et mostrati, non solamente d'ora in hora, ma di giorno in giorno e di mese in mese non diferirebbero tra loro né anco d'un minuto secondo d'ora».

<sup>45</sup> GALILEO, *Opere*, cit., XVII, p. 103.



armille o altri tali, avessero i lati o i diametri lunghi non solo le due o tre braccia di quelle di Ticone, ma né 20, 30 e 50»<sup>46</sup>. Lo stesso anno 1639 esce a Parigi il volumetto *L'usage du cadran ou de l'Horloge physique universelle*, par Galilée, Mathematicien du Duc de Florence<sup>47</sup>, che è una sorta di manuale per la costruzione e l'uso di un misuratore di tempo. Non è chi non veda in questo misuratore uno strumento ancora imperfetto, e certamente meno preciso di quanto Galileo andasse affermando, tuttavia non vi è dubbio che il pendolo ideato da Galileo nel 1641 e realizzato da Vincenzo Galilei nel 1649, secondo quanto ricostruito sulla base delle testimonianze del Viviani<sup>48</sup> e di altra documentazione<sup>49</sup>, è il frutto della costante attenzione di Galileo per il problema della misura del tempo.

### 3) *Il ruolo del pendolo nella cronometria di precisione fino al 1670*

Anche se Galileo non ha dato una risposta adeguata alle esigenze poste dallo sviluppo della precisione nelle osservazioni astronomiche e dalla necessità di disporre di un misuratore di tempo preciso per le misure del moto dei gravi e dell'accelerazione della gravità, resta tuttavia il fatto che la scoperta dell'isocronismo delle oscillazioni attorno al 1583 e della legge del pendolo e la realizzazione di un prototipo di orologio a pendolo nel 1649 rappresentano il punto di partenza di un lungo periodo nel corso del quale l'impiego del pendolo in sostituzione del bilanciere segnerà alterne vicende, contribuendo, in una misura che è tuttavia al di sotto delle aspettative, come subito vedremo, al miglioramento degli orologi usati per misure di tempo di precisione.

Tale risposta non fu d'altra parte facile a trovare poiché il problema non era solo di natura teorica ma anche e forse soprattutto di natura metodologica. Si trattava infatti di tradurre in modo corretto nelle applicazioni pratiche e nella prassi della sperimentazione alcuni nuovi concetti come quello di *precisione* e di *attendibilità* delle misure che il metodo sperimentale andava lentamente elaborando.

Una conferma di questo fatto si ha constatando che non esiste evidenza nella documentazione scritta e manoscritta sinora conosciuta degli autori del periodo in esame di chiari tentativi di determinare la precisione interna o esterna del pendolo semplice o del pendolo composto.

Il periodo dal 1630 al 1650 sembra tuttavia cruciale per la verifica delle proprietà del pendolo e della sua *idoneità* a risolvere il problema della misura del tempo<sup>50</sup>. Nel 1632 Galileo fornisce la legge del periodo del pendolo che sarà poi verificata con misure accurate da Giovanbattista Riccioli nel 1640<sup>51</sup>. Quest'ultimo, pure intuendo, come Galileo, che l'isocronismo del pendolo fa di questo ultimo un misuratore di tempo ideale, usa orologi ad acqua e solari per la misura dei periodi di oscillazione. La prima applicazione delle oscillazioni del pendolo per lo studio del moto di un grave sul piano inclinato pare peraltro doversi attribuire a Marino Mersenne nel 1636<sup>52</sup>, il quale scoprì poi sperimentalmente, 15 anni prima della dimostrazione teorica di Huygens, il non isocronismo delle grandi e piccole oscillazioni, come riferito dallo stesso Padre Mersenne nel 1644<sup>53</sup>.

<sup>46</sup> *Ibid.*, XVIII, p. 94.

<sup>47</sup> Un esemplare di quest'opera pubblicata dall'editore Rocolet si trova anche nella Biblioteca Nazionale di Roma (Coll. 8, 33, H,21.2.). Antonio Favaro attribuisce quest'opera alla penna di Padre Mersenne (cfr. A. FAVARO, *Amici e corrispondenti di Galileo Galilei*, XXXVIII: *Marino Mersenne*, «Atti R. Istituto Veneto di Scienze, Lettere ed Arti», LXXVI, 1916-17, p. 35).

<sup>48</sup> Cfr. nota 23.

<sup>49</sup> Cfr. nota 22.

<sup>50</sup> Per gli aspetti relativi all'impiego del pendolo semplice e composto come misuratore di tempo fino al 1659 si veda: A. KOYRÉ, *An experiment in measurement*, «Proceedings of American Philorophical Society», 1953, April, p. 222.

<sup>51</sup> G.B. RICCIOLI, *Almagestum novum*, Bononiae 1651.

<sup>52</sup> M. MERSENNE, *Harmonie Universelle*, Paris 1636.

<sup>53</sup> M. MERSENNE, *Cogitata Physico Mathematica*, Parisii 1644.

Il decennio successivo, che va grosso modo da 1650 al 1660 rappresenta invece il periodo nel quale l'applicazione del pendolo all'orologio diventa una realtà. Il progetto di Galileo, basato sulla sostituzione del vecchio bilanciare degli orologi a ruota col pendolo e con l'introduzione di un tipo di scappamento che risulta in gran parte libero<sup>54</sup>, e che si differenzia perciò sostanzialmente dagli scappamenti a ruota d'incontro impiegati ancora da Huygens nel suo primo orologio<sup>55</sup> ed in quelli successivi a *ganacce cicloidali*<sup>56</sup>, rappresenta il primo tentativo di applicare le proprietà del pendolo all'orologio meccanico.

Negli anni successivi, come ormai attestato non solo dalla lettera che il Principe Leopoldo indirizzò a Huygens tramite Ismael Boulliau il 31 marzo 1659<sup>57</sup> ma anche da ulteriori recenti indagini<sup>58</sup>, prima della cessione a Salomon Coster della licenza di costruire gli orologi a pendolo secondo il brevetto di Huygens (1657), sono prodotti orologi a pendolo firmati Ant. Camerini, Giuseppe Campani e Giovanni Filippo Treffler e già nel 1658 il primo orologio a pendolo viene costruito a Londra per Ahal. Fromenteel<sup>59</sup>. Non esiste tuttavia alcuna documentazione sulle reali prestazioni di questi orologi a pendolo. Cionondimeno, se riteniamo valide le osservazioni copiose e documentate di Giovanni Hevelius, il quale usò un certo numero di orologi «misuratori di tempo» e cioè di semplici contatori a pendolo, ma anche veri e propri orologi meccanici dotati di regolatore a pendolo secondo il modello di Huygens, possiamo constatare che la precisione di questi orologi non si discosta di molto da quella degli orologi meccanici a bilanciare usati da Guglielmo IV d'Assia e da Ticho Brahe circa 80 anni prima. Afferma infatti Hevelius nel 1673 che «questi orologi a pendolo, per quanto siano più esatti, pure non hanno raggiunto ancora la perfezione e non riescono a seguire precisamente il moto diurno, come richiede la maggior parte delle osservazioni celesti, anche se a questo proposito ci sarà forse qualcuno di diverso parere». E continua: «Io ne possiedo diversissimi di questo tipo a pendolo, che sono stati messi a punto con maestria e con cura, e dall'uso costante che ne ho fatto sinora, ho scoperto che anche questi pendoli col passare del tempo si discostano, benché in misura minima, dal moto delle stelle. I pendoli producono oscillazioni molto più regolari degli orologi a peso di qualsiasi genere nondimeno capita di rado che trascorso un periodo di 24 ore coincidano fin nel minuto e nei secondi col moto celeste»<sup>60</sup>.

Malgrado la scarsità di indizi un dato orientativo della precisione dei pendoli liberi usati da Riccioli per la verifica della legge del pendolo e dei pendoli usati da Huygens per la misura dell'accelerazione di gravità può essere tuttavia ottenuto. Analizzando i dati del numero dei periodi di oscillazione di uno dei pendoli usati da Riccioli sulle 24 ore si trova infatti che l'errore relativo risulta dell'ordine di  $2/3000$  ossia circa 1 minuto al giorno. Per quanto riguarda il pendolo di Huygens essendo l'errore relativo con cui lo stesso Huygens determinò il valore dell'accelerazione di gravità  $g$  circa  $1 \times 10^{-3}$  ed avendosi

$$\Delta T/T = 0,5 \Delta g/g$$

si ha anche qui un errore assoluto in tempo di circa 0,7 minuti.

Questi risultati confermano quindi i dubbi ed anche la delusione che traspaiono nelle parole di Hevelius con riferimento alle prestazioni dei nuovi orologi meccanici a pendolo. La Tav. 1,

<sup>54</sup> Cfr. A. FAVARO, *Galileo Galilei e Cristiano Huygens*, cit.

<sup>55</sup> CHR. HUGENII *Horologium*, Hagae 1658.

<sup>56</sup> CHR. HUGENII *Horologium oscillatorium*, Parisiis 1673.

<sup>57</sup> CHR. HUYGENS, *Oeuvres Complètes*, Société Hollandaise de Sciences, III, p. 462. Uno stralcio della lettera è riportato in A. FAVARO, *Galileo Galilei e Cristiano Huygens*, cit., p. 390.

<sup>58</sup> E. MORPURGO, *L'orologio a pendolo*, cit.

<sup>59</sup> G. BRUSA, *L'arte dell'orologeria in Europa* (1978), p. 117.

<sup>60</sup> JOH. HEVELIUS, *Machina Coelestis*, Gedani 1673, I, p. 368.

nella quale sono riassunti i pochissimi dati disponibili qui discussi sulla precisione dei misuratori di tempo nel corso di circa un secolo mette chiaramente in evidenza il fatto che nessun consistente progresso è stato conseguito sino alla fine degli anni 1660 nella precisione della misura del tempo.

Tavola 1. Quadro delle prestazioni degli strumenti meccanici per la misura del tempo dal 1570 al 1670.

Autore	Epoca	Misurazione	Accuratezza	Referenza
Maestlin	1577	orologio a bilanciere	$\sim 2^m-3^m$	Maestlin, 1581
Guglielmo IV	1585	orologio a bilanciere incrociato	$\sim 1^m$	Zinner, 1979
Ticho Brahe	1588-95	orologio a bilanciere	$1^m-2^m$	Brahe, 1602
Riccioli	1642	pendolo semplice	$\sim 1^m$	Riccioli, 1651
Huygens	1661	pendolo semplice	$0,5^m-1^m$	Huygens, 1690
Hevelius	1658-60	pendolo di Huygens	$\sim 1^m$	Hevelius, 1673

In un codice manoscritto e recentemente studiato, quasi certamente appartenente alla seconda metà del XVII secolo, sono descritti alcuni orologi a bilanciere che pare siano stati addirittura modificati rispetto alla loro configurazione originaria basata sull'uso del pendolo<sup>61</sup>. Ciò sembra ulteriormente confermare l'ipotesi che dopo il grande entusiasmo del periodo che ha preceduto l'impiego del pendolo negli orologi meccanici ci si rese perfettamente conto che i nuovi strumenti non rappresentavano quel grande progresso che tutti si aspettavano e a cui era affidato l'inizio di una nuova rivoluzione nelle tecniche e nelle scienze osservative.

L'avvio di questa rivoluzione avvenne qualche anno dopo con l'introduzione dello scappamento ad ancora *à recul* per opera di William Clement (1670) da cui derivarono i moderni pendoli astronomici e con la scoperta della spirale per correggere il moto del bilanciere ad opera di Huygens (1675) che aprì la strada alla realizzazione dei precisi orologi da marina.

Dobbiamo tuttavia riconoscere che tale rivoluzione è stata preparata dalle scoperte e dalle esperienze condotte con spirito pionieristico nel corso del trentennio, che va dal 1630 al 1660, che abbiamo riassunto sinteticamente nella sottostante Tav. 2.

Tavola 2. Elenco dei più importanti avvenimenti riguardanti la storia della cronometria nel periodo cruciale 1630-1660.

- 1632 Galileo enuncia la legge del periodo del pendolo
- 1636 Mersenne usa il pendolo per misure sul piano inclinato
- 1637 Galileo propone il suo «Misuratore del tempo»
- 1640 Esperienze di Riccioli per la verifica delle leggi del pendolo
- 1641 Proposta di applicazione del pendolo all'orologio da parte di Galileo
- 1644 Mersenne mostra sperimentalmente il non isocronismo del pendolo
- 1649 Vincenzo Galilei realizza un prototipo dell'orologio a pendolo di Galileo
- 1657 Coster costruisce il primo orologio a pendolo di Huygens
- 1658 Huygens descrive il suo pendolo nel trattato «Horologium»
- 1659 Huygens dimostra teoricamente il non isocronismo del pendolo

Un ruolo non secondario per la preparazione di una tale rivoluzione mi sembra che debba essere attribuito, sulla base delle considerazioni precedentemente svolte, alle geniali intuizioni e scoperte di Galileo, alle sue certezze ed al suo entusiasmo, che seppero, sorpassando difficoltà teoriche e ostacoli metodologici, tenere vivo l'interesse e stimolare la curiosità dei suoi contemporanei e di coloro che lo seguirono attorno ad un problema di vitale importanza per lo sviluppo della scienza.

<sup>61</sup> E. MORPURGO, *Scemano gli entusiasmi*, «La Clessidra», 1956, 9, p. 15.