

# Il cielo e l'uomo: problemi e metodi di astronomia culturale

Atti del VII Convegno Nazionale  
della Società Italiana di Archeoastronomia  
*Roma, Museo Nazionale Romano,  
Terme di Diocleziano*  
28 - 29 settembre 2007

A cura di  
Elio Antonello

Società Italiana di Archeoastronomia  
2010

## Indice

Presentazione .....	iii
---------------------	-----

### **Parte prima. Orientamenti astronomici, geometrie e metodi**

Osservazioni sulla basilica sotterranea di Porta Maggiore in Roma .....	3
Parte prima: <i>I. Sciortino</i>	
Parte seconda: <i>L. Labianca</i>	
L'orientamento astrale del Tempio del Kothon di Mozia .....	15
<i>L. Nigro</i>	
Archeoastronomia: metodi e strumenti .....	25
<i>P. Moscati</i>	
The orientation of the Rujm el-Hiri Southeast Gate.....	35
<i>A. Polcaro, V.F. Polcaro</i>	
La geometria pitagorica della tomba a tholos del tesoro di Atreo di Micene.....	39
<i>M. Ranieri</i>	
Ipotesi sulla fondazione e sulla forma dell'insediamento di Drupad Kila (U.P.- India) .....	45
<i>A. Dallaporta, L. Marcato</i>	
I rapporti tra architettura e corpi celesti nell'antica Mesopotamia.....	55
<i>L. Verderame</i>	
Contenuti geometrici, metrici e calendariali delle strutture architettoniche preispanche mesoamericane .....	63
<i>M. Ranieri</i>	
Criteri di orientazione astronomica nelle strutture fortificate dell'Irlanda altomedioevale .....	81
<i>A. Gaspani</i>	
Archeoastronomia Ligustica: bilancio di venti anni di ricerche.....	97
<i>M. Codebò, H. de Santis</i>	
Penetrazione della luce del Sole al tramonto del solstizio d'inverno ed al tramonto equinoziale in una struttura a <i>tholos</i> del promontorio del Caprione (Lerici, La Spezia).....	109
<i>S. Berti, E. Calzolari, S. Marchi</i>	

### **Parte seconda. Astronomia e civiltà umana**

Tempo della creazione e ciclo precessionale nella Bibbia .....	119
<i>E.A. Bianchi, M. Codebò, G. Veneziano</i>	
Le feste romane dei solstizi: <i>Fors Fortuna</i> e <i>Saturnalia</i> .....	133
<i>L. Magini</i>	

Glimpses into the Inca astronomy from a Jesuit document of the early 17 <sup>th</sup> century .....	137
<i>L. Laurencich, G. Magli</i>	
Quel cane di Sirio: una stella su Roma antica. Antropologia astronomica nella poesia e nella trattatistica latina.....	147
<i>D. Ienna</i>	
XP, SATOR e le radici ebraiche del cristianesimo. La simbologia olistica e l'astronomia culturale.....	163
<i>T. Brescia</i>	
I luoghi dell'astronomia in città: Roma e Praga, due capitali sullo stesso meridiano.....	173
<i>N. Lanciano</i>	
Il Salone dei Mesi di Schifanoia: dal rilievo alla lettura critica .....	181
<i>M. Incerti</i>	
Note sulla datazione della SN 1054 dalle fonti orientali.....	187
<i>G. Lupato</i>	

### **Parte terza. Storia dell'astronomia**

Ipotesi e considerazioni circa la geografia sottostante i due orologi catottrici del XVII secolo realizzati a Roma dal Maignan .....	193
<i>M. Berardo, N. Lanciano</i>	
La precisione di Galileo sulle distanze dei satelliti Medicei .....	207
<i>F. Castaldi</i>	
La forma della Terra nei Principia di Newton.....	219
<i>V. Banfi</i>	

### **Parte quarta. Cultura e società**

Il Far West dei Greci: tutto vero? Tutto vero!.....	231
<i>S. Frau</i>	

# La precisione di Galileo sulle distanze dei satelliti Medicei

Francesco Castaldi  
Gruppo Astrofili G. e A. Bernasconi, Saronno (VA)  
francescogast@alice.it

**Riassunto.** Galileo non descrisse il dispositivo di cui fece uso per definire, mediante il cannocchiale, le distanze di Giove dai suoi satelliti; tuttavia egli ottenne una messe di dati del tutto apprezzabili se sottoposti al vaglio di un simulatore di planetario computerizzato e non dimenticando le condizioni nelle quali si trovò ad operare. Questo progresso avvenne negli anni successivi al 1610 (pubblicazione del *Sidereus Nuncius*), ma non fu reso pienamente noto se non assieme alla compilazione dell'Edizione Nazionale (1890-1909) de "Le opere" di Galileo. L'articolo tratta principalmente dell'unità di misura usata nel *Nuncius* per definire le distanze e dell'unica rivelazione, sul dispositivo galileiano, che avvenne nel 1666 a opera di A. Borelli.

**Summary.** Galileo never described the device he used to measure distance of Jupiter from its satellites by means of his telescope; nevertheless the results he obtained were remarkably precise when compared with a planetarium computer code and taking into account his operating conditions. This progress took place in the years following 1610 (date of the publication of "Sidereus Nuncius"), but became well-known only with the compilation of Galileo's complete works in the National Edition of "Le Opere" (1890-1909). This article discusses the measuring unit used in "Nuncius" to define the distances and the only description of the Galilean device given by A. Borelli in his work of 1666.

## 1. Gli incrementi di precisione<sup>1</sup>

All'inizio del *Sidereus Nuncius*, pubblicato nell'aprile 1610, leggiamo come Galileo pensava di ottenere le distanze, fra i corpi celesti che ricadevano dentro il campo di osservazione del cannocchiale, mediante qualcosa da anteporre all'obbiettivo: *Se adatteremo sottili lamine perforate, certe con fori maggiori, altre con fori minori, scegliendo ora questa ora quella, a seconda della necessità, formeremo fin che si vuole archi via via diversi che sottendono minuti in numero maggiore o minore; per mezzo loro potremo comodamente misurare le distanze degli astri localizzati ad alquanti minuti fra loro con un errore minore di uno o due minuti*<sup>2</sup>.

Galileo citò questa specie di mascherina ancora una volta nel *Nuncius* in corrispondenza all'osservazione del giorno 11 gennaio 1610: (...) *misurai anche al telescopio le loro reciproche distanze, nel modo spiegato più sopra*. Ad ogni modo, da questa data comincia l'indicazione delle distanze fra Giove ed i satelliti in minuti e secondi; quanto all'interrogativo se si trattasse di misure di arco o di semidiametri di Giove in forma sessagesimale, rimandiamo la discussione al §2, avvertendo fin da ora che non si trovano precisazioni che chiariscano il dubbio.

---

<sup>1</sup> Per le simulazioni di planetario, da cui ricaviamo i valori di distanze da confrontare con quelli di Galileo, usiamo il programma *Perseus*, di F. Riccio, Milano.

<sup>2</sup> Galilei G., *Le Opere*, Edizione Nazionale (1890-1909) a cura di Antonio Favaro, Firenze, Barbera Editore, Vol. 3, Parte Prima (1892), p. 61 e 62.

Un storico ed esperto di ottica, Vasco Ronchi, a proposito dei tentativi di dimostrazione svolti in ottica da Galileo, scriveva così: (...) *Galileo non aveva alcuna dimestichezza con «la dottrina delle rifrazioni» e avrebbe fatto meglio a non entrare in particolari in questo campo perché avrebbe evitato di esporre un ragionamento evidentemente sbagliato.* E alla nota successiva il commento del Ronchi verteva ancora sulla scarsa conoscenza di Galileo nei riguardi dell'ottica.<sup>3</sup>

Solamente a distanza di circa 2 anni dalle osservazioni del *Nuncius*, nei suoi appunti di osservazioni Galileo scrisse una frase che fissa al 31 gennaio 1612 la data del primo utilizzo di un suo nuovo dispositivo per ricavare le distanze fra Giove e i suoi satelliti e che, fuor di dubbio, continuò ad usare per tutti gli anni successivi. Non è documentato alcun suo chiarimento, però si ritiene che questo sia il dispositivo che al §3 leggiamo nella presentazione del Borelli.

I progressi di Galileo sui quattro satelliti andarono di pari passo con i propositi che si era dato e pertanto:

- fino alla pubblicazione del *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua*, aprile 1612, la principale occupazione di Galileo erano stati i loro periodi di rivoluzione sinodica, finalmente ivi rivelati;

- in questo libro accenna anche al suo nuovo traguardo, cioè alla determinazione delle loro posizioni:<sup>4</sup> *Per simili precisioni non mi bastano le prime osservazioni, (...) perché non avendo io allora ritrovato modo di misurar con istrumento alcuno le distanze di luogo tra essi pianeti [satelliti], notai tali interstizi colle semplici relazioni al diametro del corpo di Giove, prese, come diciamo a occhio; le quali, benché non ammettano l'errore d'un minuto primo, non bastano però per la determinazione dell'esquisite grandezze di esse stelle. Ma ora che ho trovato modo di prender tali misure senza errore anche di pochissimi secondi, continuerò le osservazioni sino all'occultazion [congiunzione] di Giove; le quali dovranno essere a bastanza per l'intera cognizione de' movimenti e delle grandezze de gli orbi di essi (...).*

Galileo fa capire qui, abbastanza chiaramente, due fatti:

- fino al 31/1/1612 le misure furono frutto di semplici congetture "a occhio"<sup>5</sup>;

- il minuto, che vedremo come unità di misura del *Nuncius*, corrisponde al semidiametro apparente di Giove a qualsiasi distanza dalla Terra, senza relazione a misure di arco.

Galileo, ora, ostentava sicurezza sulla precisione dei suoi dati osservativi e così scriveva a Giuliano dei Medici il 23-6-1612 ricordando Keplero: (...) *il quale credo che sentirà con gusto come io ho finalmente trovati i periodi de i Pianeti Medicei, e fabbricate le tavole esatte, sì che posso calcolare le lor costituzioni passate e future senza errore d'un minuto secondo.* Il curatore de *Le Opere* di Galileo, Antonio Favaro, si sente in dovere di precisare che il proposito di introdurre anche i secondi nelle tavole durò poco, poi Galileo tornò ad arrotondare ai minuti primi<sup>6</sup>.

Nei riguardi delle distanze di Giove dai satelliti o fra i satelliti stessi, è interessante riassumere l'evoluzione del modo d'indicarle seguito da Galileo:

a) rimandando al §2 il problema delle distanze nel *Nuncius*, Galileo prese come unità di misura il raggio di Giove perché gli permetteva di preparare tavole dei moti dei satelliti

<sup>3</sup> Ronchi V., *Scritti di ottica*, Ediz. Il Polifilo, Milano, 1968, nota 3 a p. 362 e nota 4 a p. 364.

<sup>4</sup> Galilei G., (op. cit), Vol. 4, p. 64

<sup>5</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte 2, p. 673. Attorno al 1616 Galileo si appuntava ancora: *In effetti, mediante molte esperienze, è stato da me rivelato che nelle prime osservazioni mi ero sbagliato nel determinare le elongazioni delle stelline da Giove che stabilii minori di quanto fosse valido (...).*

<sup>6</sup> Galilei G., (op. cit), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, *Avvertimento*, p. 416.

durante l'intero periodo sinodico di Giove a prescindere dalla sua distanza dall'osservatore terrestre e ciò accadde quando decise di determinare le massime elongazioni dei satelliti ed i loro moti medi<sup>7</sup>;

b) dai tempi del *Nuncius* e fino al 26 marzo 1612 Galileo indicò le distanze dal bordo di Giove, secondo quanto si comprende dai suoi appunti manoscritti<sup>8</sup>;

c) almeno a partire dall'osservazione del 7/11/1612, Galileo si mise ad indicare le distanze dal centro di Giove<sup>9</sup>; e continuò fino a quella del 19/11/1619 che, non essendoci pervenute successive osservazioni, è presunta essere la sua ultima<sup>10</sup>; il Favaro, a proposito dei tanti fogli sparsi di calcoli lasciatici da Galileo, mette in rilievo, quanto alle osservazioni che li accompagnano, che (...) *d'esse non vi ha diario regolare perché sembrerebbe che Galileo le facesse soltanto per verificare le predizioni ottenute da effemeridi e calcoli previamente eseguiti*<sup>11</sup>;

d) infine, i giovilabi aggiungono un'indicazione sui progressi conseguiti da Galileo; infatti troviamo le orbite dei satelliti disegnate in cerchi (concentrici al centro di Giove), dai quali si ricavano i valori di *massima digressione* ovvero i semiassi orbitali, ovviamente in semidiametri di Giove<sup>12</sup>.

Tabella 1.	Datazione	Io	Eur.	Gan.	Call.
Giovilabio p. 477	Prima metà del 1611	3.5	5.66	8.83	15.33
Giovil. p. 479	1611	3.83	6.2	8.4	15
Giovil. p. 481	1611	4	7	10	15
Giovil. p. 483	Inizio 1612	4.75	7.33	10.33	18
Giovil. p. 486-7	marzo 1612	5.66 <sup>13</sup>	8.66	14	24
Calcolo p. 734	14/1/1617	5.83	8.75	14	24.66
Lettera a Castelli	2/8/1627	5.59	8.62	14	25 (quasi)
Dati moderni		5.90	9.38	14.97	26.34

In Tabella 1, nella prima colonna, abbiamo indicato le pagine dove si trovano gli schemi<sup>14</sup>. Nella riga dei dati moderni abbiamo ridotto in raggi equatoriali di Giove (71492 km) i semiassi presi in km per ciascun satellite (da Io a Callisto: 421600, 670900, 1070000, 1883000)<sup>15</sup>.

E' notevole l'approssimazione ai dati moderni conseguita da Galileo, per cui si passa dal dato della sua lettera al Castelli a quello moderno con un fattore circa 1.06; ciò non proviene soltanto da una più raffinata misura del diametro di Giove mediante osservazioni, quanto piuttosto da ripetuti calcoli e successive verifiche con nuove osservazioni, sfruttando certi assetti particolari dei satelliti: ma la fortuna aiuta chi insiste nel lavoro e Galileo non lesinò fatiche in quegli anni, come si evince dalle decine di pagine di

<sup>7</sup> Galilei G., (op. cit), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, *Avvertimento* del curatore A. Favaro, p. 406.

<sup>8</sup> Galilei G., (op. cit), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, per esempio alle pp. 436, 449 e 673.

<sup>9</sup> Galilei G., (op. cit), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, p. 450.

<sup>10</sup> Galilei G., (op. cit), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, *Avvertimento*, p. 409 e p. 423.

<sup>11</sup> Galilei G., (op. cit), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, *Avvertimento*, p. 409.

<sup>12</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte 2. Si tratta dell'*Avvertimento*, p. 416-7. Nel libro del Borelli, più avanti citato per esteso, a p. 12 troviamo le distanze prese dal giovilabio di p. 486-7, corrette solo per Callisto col calcolo di p. 734.

<sup>13</sup> A p. 418 dell'*Avvertimento* è scritto erroneamente 4 e 2/3.

<sup>14</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte 2 e per la lettera al Castelli Vol. 13, p. 370.

<sup>15</sup> Almanacco UAI 2007, p. 131 e 132.

osservazioni e di calcoli riprodotte nel volume sopra citato de *Le opere*, per non parlare delle tante pagine che si pensano perse<sup>16</sup>.

Nei suoi appunti Galileo cita delle situazioni, confermate dalle nostre simulazioni, come:

- 13/12/1612: “A 0<sup>h</sup> 30<sup>m</sup> prima del sorgere del Sole, i due più vicini a Giove [Ganimede e Io] si toccavano quasi, anzi proprio si toccavano e da questa precisa osservazione poté conseguire una correzione delle Tavole”<sup>17</sup>.

- 17/12/1612: “In effetti quello occidentale [in apparenza unico] fu di due congiunti [Europa e Ganimede] che rimasero sempre in congiunzione, di modo che appena a 0<sup>h</sup> 30<sup>m</sup> prima del sorgere [del Sole] poté avvertirsi qualcosa di un inizio di separazione (...); questa osservazione conduce in modo meraviglioso alla correzione delle Tavole”.

Nonostante questa mole di lavoro, soltanto alla fine di “*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari*” (1613) si trova l’unico esempio di pubblicazione, quattro pagine di grafici per il periodo 1° marzo-8 maggio 1613, con i satelliti disposti lungo linee e le distanze da misurare in funzione del cerchietto di Giove, come si evince dalle spiegazioni (*Poscritta*)<sup>18</sup>. Resterebbe una dimostrazione di bravura prevalentemente *qualitativa* se Galileo non avesse messo alla prova alcune effemeridi particolari da lui previste e fra le più stimolanti per un osservatore che desidera verificarne la precisione: l’inizio o la fine delle eclissi, quando un satellite entra nel cono d’ombra di Giove o ne esce, denotando la cognizione delle relazioni intercorrenti fra orientamento dell’ombra di Giove e orbita del satellite, assieme all’angolo di fase Terra-Giove-Sole e alle loro distanze relative.

Così per il 24 aprile egli prevede, nei riguardi del satellite più lontano, Callisto, il termine di una eclisse che in effetti fu radente. Segue una previsione azzeccata per Ganimede: *Il 27 pur di aprile il pianeta orientale prossimo a Giove non si vedrà sino a circa le 4 ore di notte, dimorando sino a quel tempo nell’ombra; uscirà poi repentinamente e scorgerassi già lontano da Giove quasi un diametro e mezzo*. Con le simulazioni vediamo questo satellite terminare la sua eclisse circa alle 23. Altre effemeridi verificate con precisione si riferiscono a due finali di eclissi di Io.

## 2. L’unità di misura del *Nuncius*

Ora torniamo al problema iniziale, cioè quando Galileo, convinto di avere scoperto quattro lune attorno a Giove, tentò di valutare le distanze apparenti fra loro o rispetto a Giove stesso<sup>19</sup>.

Continueremo a chiamare i satelliti secondo le iniziali dei nomi dati da Simon Mayr (1614): I=Io; E=Europa; G=Ganimede; C=Callisto; ed inoltre J=Giove. Naturalmente nel *Nuncius* non compare alcuna distinzione dei satelliti fra loro, mentre è curioso accorgersi

---

<sup>16</sup> Ad evidenziare l’interesse di quei tempi sui satelliti medicei, non dimentichiamo mons. G.B. Agucchi, uomo di lettere curioso di scienze, che in un suo scritto della fine del 1611, riporta i raggi delle orbite dei satelliti con valori uguali a quelli del giovilabio di pag. 481. Vedi Favaro A., *Amici e corrispondenti di Galileo*, Atti dell’Istituto Veneto di scienze etc., anno 1902-4, Tomo LXIII, Parte II, pp.185-7. Anche: Castaldi F., *Le ricchezze nascoste del Sidereus Nuncius e i periodi di rivoluzione dei satelliti di Giove*, Physis, Vol. XLIV (2007) Nuova Serie, Fasc. 2, pp. 377-392.

<sup>17</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte 2, p. 451.

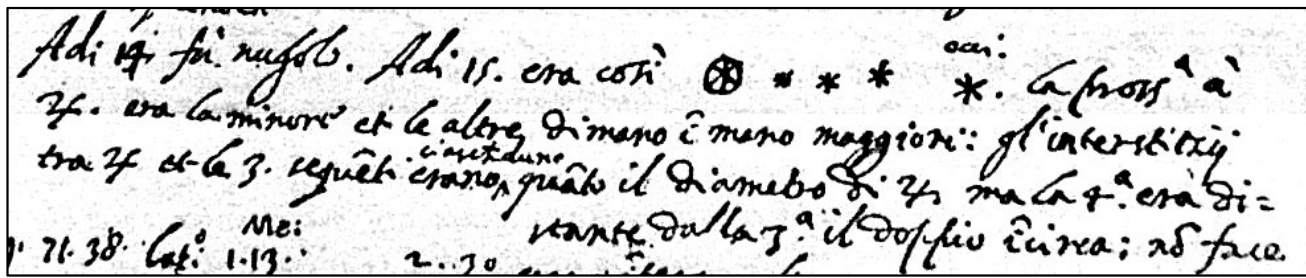
<sup>18</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 5, Parte 2, p. 241-249. Da notare quanto confessa a proposito delle eclissi satellitari (...) *variamente soggette [alla] mercé delle diverse inclinazioni del cono dell’ombra dell’istesso corpo di Giove; il quale accidente confesso che mi travagliò non poco avanti che la sua cagione mi cadesse in mente*.

<sup>19</sup> Drake S, *Telescopes, Tides & Tactics*, University of Chicago, 1983, p. 218. Senza entrare in discussioni, noi svolgiamo delle differenti considerazioni su questo dibattuto argomento.

che non è specificato il semidiametro di Giove come unità di misura o se i minuti primi e i secondi che Galileo indica siano relativi a misure di arco.

Per analizzare il problema riteniamo utile paragonare i valori messi nella stampa del *Nuncius* [S] con i corrispondenti dati del manoscritto di appunti [M] che comprende, dal 7/1/1610 fino al 16/2/1610, la parte delle osservazioni successivamente riportate nel *Nuncius*<sup>20</sup>. Per la prima volta l'11 gennaio 1610, circa a 19<sup>h</sup> locali, e soltanto in [S] Galileo fornisce una distanza sommaria di C da J pari a 3 volte quella di C da G. Alla data del 12 gennaio, allorché J si trova in mezzo fra G a oriente e E a occidente, in [S] leggiamo: (...) *Ciascuno distava da Giove due minuti primi*. Mentre in [M] è precisato: (...) *et Giove era in mezzo lontano da l'una e dall'altra quanto il suo diametro in circa*. Si deduce che Galileo, arrivando alla stesura del *Nuncius*, decise per un diametro medio di Giove pari a 2 minuti.

Fino al 15 gennaio, in [M] Galileo scrive in Italiano, ma quando torna a scrivere all'ora settimana comincia ad usare il latino<sup>21</sup>. Riproduciamo da [M] in Figura 1 la prima osservazione del 15 dove si comprende che le distanze erano prese dal bordo, non dal centro, di Giove.



**Fig. 1.** Si legge: *Adi 14 fu nugolo. Adi 15 era così. La prossima a Giove era la minore et le altre di mano in mano maggiori: gl'interstizi tra Giove et le 3 seguenti erano ciascheduno quanto il diametro di Giove, ma la 4<sup>a</sup> era distante dalla 3<sup>a</sup> il doppio incirca: (...).*

L'osservazione di Figura 1 in [S] diventa: "Il 15, alla terza ora della notte, quattro stelle erano situate come segue rispetto a Giove [figura analoga]. Erano tutte a ovest (...); le distanze fra Giove e le vicine tre erano uguali e ciascuna di due minuti; ma la più occidentale distava dalla sua vicina minuti quattro (...). Così in [S] il diametro di Giove è ribadito pari a 2 minuti.

Ancora, il 16 in [M] le distanze sono espresse in diametri: (...) *le due più vicine a Giove, da una parte e dall'altra, distavano circa la quarta parte del suo diametro [30 secondi], mentre la terza a ovest distava dallo stesso il quadruplo del suo diametro (...)*. In [S] queste due misure sono aggiustate in 40 secondi e in 8 minuti, confermando ancora la trasformazione del valore del diametro di Giove attorno ai 2 minuti.

Per renderci conto dell'utilità di [M] al fine di seguire l'evoluzione sul problema, al 18 troviamo prima due misure in minuti e non più in diametri di Giove, seguite dalla precisazione: *Secondo la mia stima il diametro di Giove occupa 3' o qualcosa di meno*. Questi non possono che essere 3' di arco, ma poco dopo Galileo dovette convincersi a

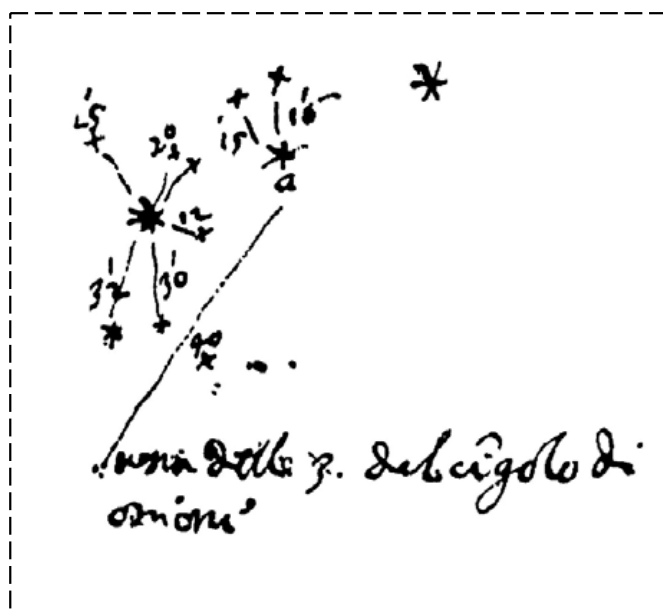
<sup>20</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, p. 427 e segg. Gli appunti dopo il 16 febbraio fino al 2 marzo furono persi.

<sup>21</sup> Qui compare per la prima volta, per l'ora ottava, una distanza fra E e G di 40", diminuiti a 30" in [S].



ritenere il diametro apparente di Giove in quel periodo intorno ai 2 minuti di arco<sup>22</sup>. Un altro fatto conferma questi 2 minuti: in [M] le distanze all'inizio sono specificate *dal centro di Giove*, mentre in [S] ciò non è precisato; dunque non pare casuale che in 4 casi (18, 21, 22 gennaio) venga tolto 1 minuto (appunto quanto un semidiametro) quando si passa da [M] a [S], mentre in 2 casi (19 e 22 gennaio) c'è la conferma. Ad ogni modo, Galileo in [S], per aggirare l'ignoranza del reale diametro di Giove in misura di arco, sottintese di adottare le distanze dei satelliti dal bordo, non dal centro di Giove<sup>23</sup>. In seguito non ci sono più correzioni fra [M] e [S].

Aggiungiamo che su [M] si trova un indizio certo intorno alla iniziale unità di misura di Galileo: a pag. 430, alla data del 23/1/1610, Galileo introduce un fuori programma fra le osservazioni di Giove e disegna zone di Orione e del Cane con distanze fra le stelle in primi, indiscutibilmente di arco (Figura 2).



**Fig. 2.** Particolare di p. 430. Le tre stelle maggiori, da sinistra, sono ζ, ε (segnata “a una delle 3 del cingolo [cintura] di Orione”) e δ. Attorno a ζ (Zeta) sono indicate 7 stelline tutte reperibili in simulazione. Confrontiamo le distanze da ζ, partendo da quella più alta, in senso orario: SAO 132446 (25' di Galileo contro 26'16" di *Perseus*); SAO...434 (20' contro 20'2"); ...431 (distanza non indicata); ...428 (12' contro 12'15"); ...438 (40' contro 30'14"); ...451 (30' contro 21'50"); ...464 (32' contro 23'8"). Lo stesso vale per le due stelline segnate sopra la “a”: SAO132356 (15' contro 12'6"); ...337 (16' contro 14'19").

Anche se il disegno non rispetta le proporzioni, si comprende che le distanze (note in base ai cataloghi) fra le 3 stelle della cintura (ε dista da ζ 1°21'22" e da δ 1°23'10") avevano aiutato a definire “a occhio” le distanze delle altre, che quindi sono indicate senza dubbio in primi di arco.

Da notare in Figura 2 una certa tendenza di Galileo a sbagliare per eccesso, a differenza delle distanze dei satelliti dove l'errore è quasi sempre per difetto a causa del riferimento

<sup>22</sup> Nella realtà il diametro apparente variò circa da 49".5 a 42" di arco nel periodo considerato nel *Nuncius*, gennaio-inizio marzo 1610.

<sup>23</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>. Ad ogni modo a p. 673 c'è la conferma scritta che nel *Nuncius* le distanze sono prese a partire dalla circonferenza di Giove.

al semidiametro apparente di Giove che il suo cannocchiale sovradimensionava<sup>24</sup>. Abbiamo svolto questa considerazione perché non è pensabile che Galileo in [M], da una data e da una pagina all'altra, con il termine "minuti" designasse differenti unità di misura.

Per tirare una conclusione, riteniamo che Galileo, inizialmente convinto di un valore orientativo di 1' di arco da attribuire al semidiametro di Giove, decise in seguito di non precisare nel *Nuncius* l'unità di misura, consapevole che avrebbe potuto compilare tavole dei moti per calcolare le effemeridi dei satelliti facendo uso di questo genere di unità di misura che, con le sue variazioni, prescindeva dalla distanza del pianeta dall'osservatore terrestre.

Viene utile, come unico paragone con un testo stampato dell'epoca, considerare un altro pioniere e pretendente alle scoperte di Galileo, quel Simon Mayr che, pubblicando *Mundus Iovialis*, avanzò le sue priorità con un ritardo di circa 4 anni sul *Nuncius*. Ad ogni modo, Mayr arrivò ai suoi risultati partendo da un dato che non dà spazio ad equivoci: *Infatti per più giorni vidi in cielo il suo diametro [di Giove], alla distanza media da Terra, sottendere non più di 1'. Da questo dato fondamentale mi sforzerò di investigare l'ampiezza complessiva e il cerchio estremo del mondo gioviano, e ciò nel modo seguente*<sup>25</sup>.

Seguono alcuni calcoli per dimostrare come dedusse le elongazioni massime dei satelliti in primi di arco partendo dal suddetto valore del diametro gioviano; alla distanza media Terra-Giove, che per lui valeva 5.217 volte la distanza media Sole-Terra (vicina alle attuali 5.202 UA), queste erano le elongazioni massime dal centro di Giove: a) Io 3'; Europa 5'; Ganimede 8'; Callisto 13' di arco. I dati che ricaviamo oggi nella situazione di distanza media sono circa: b) Io 1'.867; Europa 2'.590; Ganimede 4'.733; Callisto 8'.317 di arco.

Si constata che, moltiplicando i dati b) per qualcosa come 1.57, si arriva molto vicino ai valori a); e che, moltiplicando per 1.57 il diametro equatoriale di Giove (che alla distanza media appare di circa di 38" di arco), arriviamo ad 1', che è il dato di Mayr.

Da ultimo, usando come unità di misura il semidiametro di 0.5' attribuito da Mayr a Giove, le elongazioni massime riportate in a), risultano: Io 6; Europa 10; Ganimede 16; Callisto 26 semidiametri. Sono valori assai precisi a paragone con i migliori di Tabella 1, il che riscatta almeno qui il Mayr dalle sue pretese tardive.

### 3. I metodi accennati e supposti di Galileo.

Veniamo ora al noto dispositivo del quale Galileo cominciò a fare uso verso fine gennaio 1612. Abbiamo detto che non ne abbiamo descrizioni dirette, né di Galileo, né di suoi discepoli, però certe osservazioni inviategli in date posteriori al 31/1/1612 dal fedele allievo padre B. Castelli (1577-1643) fanno supporre che questi ne fosse stato messo al corrente in considerazione della precisione ivi dimostrata, di gran lunga superiore alle

---

<sup>24</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, "Avvertimento", pag. 405. Fra l'altro il curatore scrive che Galileo "non riusciva a distinguere i satelliti altro che alla distanza di almeno tre semidiametri dal centro di Giove". Invece in Drake S. e Kowal C.T., *L'osservazione di Nettuno fatta da Galileo*, Le Scienze, febbraio 1981, n° 150, p. 23 si dice che raramente Galileo distingueva un satellite se non si trovava a più di un raggio gioviano dal bordo di Giove ossia 2 semidiametri dal centro. Le simulazioni al computer ci trovano d'accordo col primo autore.

<sup>25</sup> Mayr S., *Mundus Jovialis*, Norimberga, 1614, (pagine non numerate). Qui ci riferiamo a *Prima Pars, De amplitudine Mundi Jovialis*, (inizio). Poco sotto scrive anche: *Mediante osservazioni mie personali e di Galileo si ricava che il quarto satellite, cioè quello che si allontana di più da Giove, alla distanza media Giove-Terra scorre da una parte all'altra di Giove di quasi 13'*.

osservazioni dello stesso Galileo antecedenti l'adozione del dispositivo in discussione<sup>26</sup>. Altre osservazioni si trovano poi nella stessa corrispondenza fra i due, però senza dare alcun riferimento al dispositivo galileiano. Per una idea sommaria su questi particolari riguardanti il Castelli, in coda all'articolo (Appendice) abbiamo riassunto in una tabella i dati assieme ai possibili paragoni.

Ancora un tardo accenno al dispositivo è contenuto nella risposta indirizzata a Galileo il 5/3/1638 dal suo più giovane allievo Vincenzo Renieri: <sup>27</sup> *Dalla prima vista della sua lettera non ho ben compreso il modo di misurar le distanze col'occhiale, ma forse col por in opra lo strumento l'intenderò meglio. Tra tanto m'avvisi se la righetta va contro l'occhio libero, perché contro al'occhio [oculare] del telescopio non mi par che si possa accomodare.* Purtroppo, la lettera con la quale Galileo gli aveva fornito la spiegazione andò perduta.

Qualche particolare emerge dalla successiva lettera del 16/4/1638 del Renieri.<sup>28</sup> *Fino dalla prima sua ben considerata, ponendo in opra il telescopio, compresi benissimo il modo d'adoprarlo e di misurar gl'intervalli dei pianeti di Giove: non ho però potuto ancora mettermi al'opra, per essere sempre stato impiegato (...) in altre incombenze.*

La corrispondenza del Renieri è nutritissima e denota, soprattutto sui satelliti di Giove, un interesse profondo, però non troviamo riferimenti al dispositivo sopra accennato e se i buoni risultati, descritti dall'allievo nelle lettere successive, fossero una conseguenza della sua applicazione pratica; oltre tutto, la prematura morte del Renieri rese impossibile la pubblicazione dell'opera che stava preparando e solo nel 1929 fu pubblicata una parte delle sue osservazioni<sup>29</sup>.

Sull'utilizzo del dispositivo di Galileo troviamo un esauriente commento in un'opera, *Theoricae Mediceorum planetarum*, pubblicata nel 1666 da Alfonso Borelli (1608-1679)<sup>30</sup>; i suoi legami con Galileo non erano stati stretti eppure, per interessamento di padre Castelli che lo aveva fatto raccomandare da Galileo stesso, ricevette l'incarico per letture di matematiche all'Università di Pisa. Ad ogni modo, Borelli conosceva certi manoscritti di Galileo, morto da più di un ventennio, in quanto, per incarico dal Granduca di Toscana, aveva esaminato le sue tavole di calcolo producendone effemeridi poi verificate grazie ad un nuovo telescopio Campani, come riferisce a pag. VI del *Theoricae*. Ebbe forse la ventura di leggere delle carte che in seguito andarono perdute, ovvero p. Castelli gli aveva rivelato qualcosa?

Al Cap. IV, *Metodo col quale si possono misurare le distanze dei satelliti dal disco o corpo di Giove*, Borelli spiega le difficoltà per conoscere i semiassi delle orbite dei satelliti, con conseguente varietà di risultati ottenuti dai diversi ricercatori. E aggiunge: *Percepì questa difficoltà il grande Galileo, per aggirare la quale escogitò un artificio bellissimo, certamente degno della sagacia e dell'ingegno di un tale uomo, ma quasi nessuna utilità poté conseguire dalla sua invenzione ai suoi tempi, quando i telescopi non*

<sup>26</sup> Galileo G., op. cit., Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, p. 447 e 448.

<sup>27</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 17, p. 307

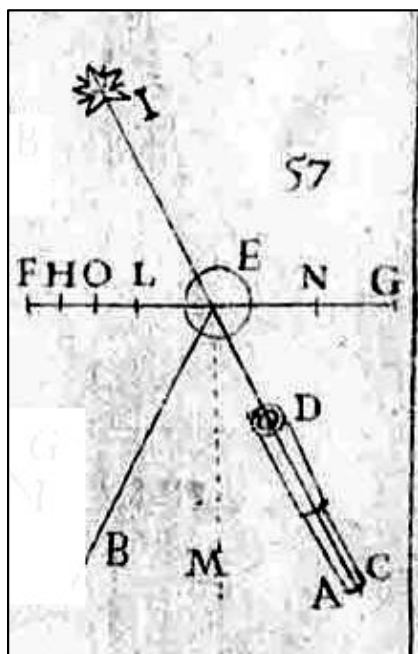
<sup>28</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 17, p. 325.

<sup>29</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte Seconda. Si tratta dell'*Avvertimento* (p. 889) aggiunto nella ristampa del 1929 dove sono pubblicate per la prima volta le osservazioni svolte dal Renieri dal 1639 al 1647, anno della sua morte.

<sup>30</sup> Borelli A., *Theoricae Mediceorum planetarum ex causis physicis deductae*, Firenze, 1666, pp. 141-144. Una specifica indicazione si trova nell'*Avvertimento*, Galilei (op. cit.), Vol. 3, Parte 2<sup>a</sup>, p. 416, nota 1. La stessa Figura 2 è in altro *Avvertimento* aggiunto nella 2<sup>a</sup> edizione delle Opere del 1929-39; e il curatore giustifica questa necessità col fatto che non ci è pervenuto (...) *l'artificio usato da Galileo per misurare direttamente le distanze dei satelliti a partire dal 31/1/1612 nella descrizione fattane da lui stesso (...)*.

erano giunti a quella perfezione alla quale in questi tempi sono costruiti. Questa affermazione è smentita dai progressi sopra menzionati a partire da fine gennaio 1612, di cui ci si rende conto paragonando molte pagine autografe di Galileo<sup>31</sup>.

Ritorniamo al Borelli. *L'artificio di Galileo si rifà ad un utile inganno della nostra visione che sarà valido esporre, onde trarne qualche vantaggio: gli esperti di ottica insegnano che la distanza degli oggetti visibili non è percepita in quanto tale, cioè non grazie proprio al senso della vista, ma viene percepita da qualche più subliminale facoltà, in base ad un giudizio e ad un certo raziocinio. Dunque, se con due occhi viene osservato qualche oggetto visibile, di modo che vi convergono i due assi visuali che s'intersecano reciprocamente sullo stesso oggetto visibile, allora nella predetta convergenza si può pensare una qualche superficie piana alla quale l'asse comune, cioè una retta condotta fra i due occhi, sia perpendicolare, e tale piano si potrà chiamare luogo finale della visione (...).* Il discorso, con cenni di notevole modernità, spiega come riceviamo da ognuno degli occhi una distinta immagine, ma la natura e l'istinto le sovrappongono nella mente. Poi Borelli riprende facendo riferimento alla figura 57 (Tavola IV in fondo al suo testo) riprodotta in Figura 3.



**Fig. 3.** *Ciò supposto, si osservi Giove (I) con l'occhio destro A al telescopio CD; poi, con l'occhio sinistro B aperto, si diriga l'asse visuale BE in modo da intersecare l'altro asse AE, passante attraverso il telescopio, nel punto E; e per il punto E si fissi un qualche reticolo o rastrellino FG perpendicolare al comune asse EM degli occhi, si evince da quanto detto che la visione finisce nel piano FG e pertanto tutti gli oggetti visti con i due occhi per effetto della vista si collocano nel detto piano FG; e poiché l'occhio destro A vede la stella ingrandita al telescopio in E e l'occhio sinistro B percepisce il reticolo o rastrellino FG, [l'osservatore] stimerà il disco ingrandito di Giove occupare un interstizio del reticolo e perciò si potrà misurare il diametro del disco di Giove E in funzione all'ampiezza del reticolo o del rastrellino FG (...)*

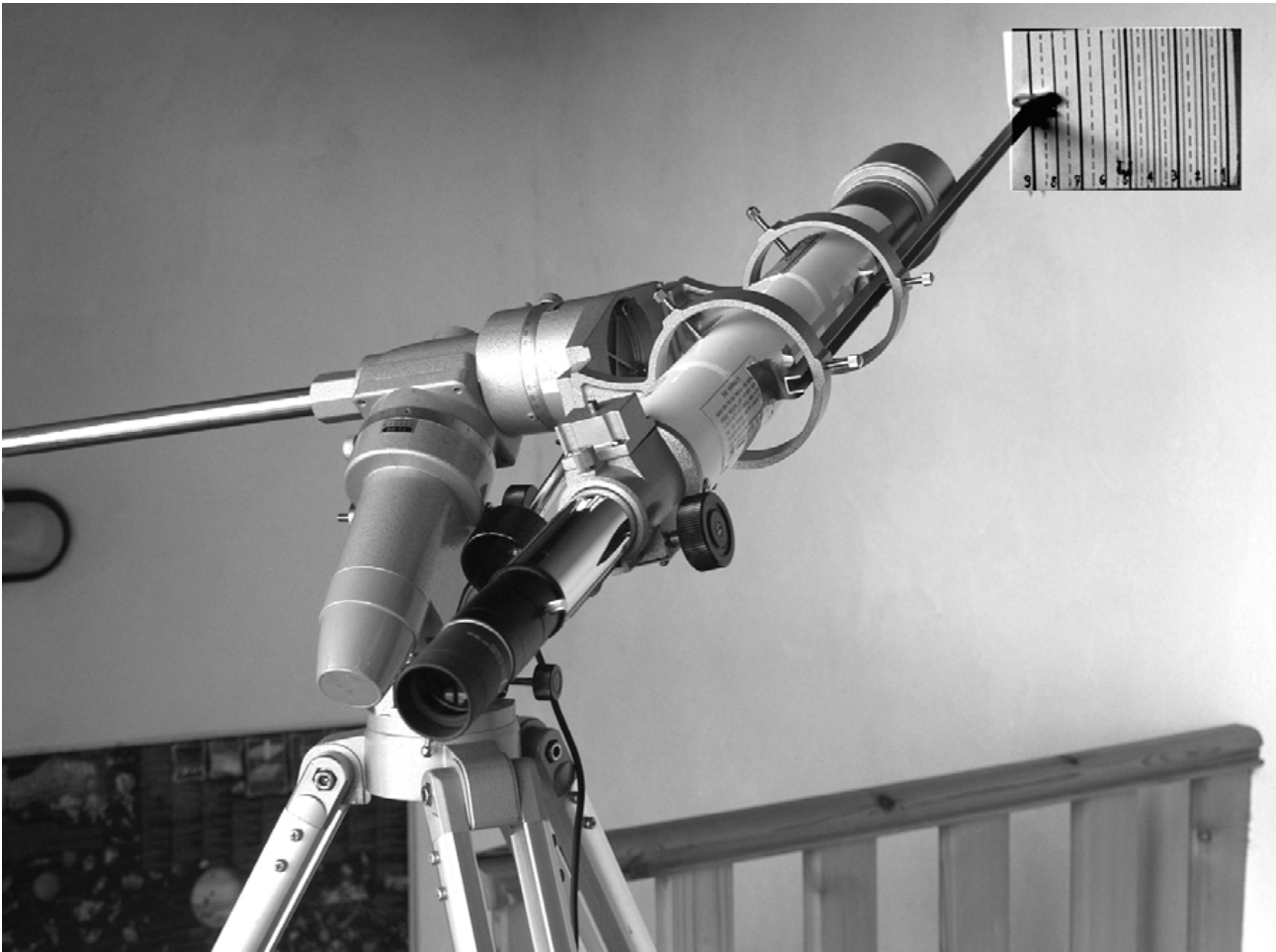
Borelli prosegue insegnando come suddividere opportunamente l'intera lunghezza FG e conoscere le distanze dei satelliti in diametri di Giove, ma non fa mancare le critiche in quanto lui stesso sperimentatore dello strumento. Così ricorda quanto abbiamo detto sul disco di Giove, che appare sempre maggiore del vero; sul tremore dell'immagine (*seeing*) che porta a diminuire la distanza fra i satelliti e Giove: per questo raccomanda di agire con cieli sereni e Giove a forte altezza. A proposito degli spostamenti di Giove, non dimentichiamo che Galileo aveva una complicazione in più non conoscendo la montatura equatoriale per inseguire il moto apparente del cielo<sup>32</sup>. Una terza difficoltà è imputata alla natura stessa delle lenti che producono il "coma", un'aberrazione che si presenta quando

<sup>31</sup> Castaldi F., *Indagine sui dati galileiani di distanze dei satelliti di Giove*, da *Astronomia, la rivista dell'Unione Astrofili Italiani*, n° 2, marzo-aprile 2008. Qui si trova un'analisi sull'incremento di precisione raggiunto da Galileo col suo dispositivo grazie al confronto di 250 osservazioni, di prima e dopo il 31/1/1612, prese da sue pagine autografe.

<sup>32</sup> Scheiner C., *Rosa Ursina (...). Impressio coepta anno 1626, finita vero 1630 Id. Iunii*. Qui si trova il primo disegno di una montatura equatoriale, p. 351.

l'oggetto che si osserva finisce fuori dall'asse ottico dello strumento<sup>33</sup>. Da qui la necessità di tenere la testa ben ferma, mentre si osserva. Abbiamo personalmente riscontrato in pratica le sopra esposte difficoltà e verificato che non si può sperare di scendere al di sotto di certi valori di errore (Figura 4)<sup>34</sup>.

Tuttavia il dispositivo aveva permesso a Galileo altri validi ragionamenti. Così in una sua pagina autografa troviamo una nota alle osservazioni del 21/1/1612: *Il diametro di Giove sta al semidiametro del suo cerchio [il cerchio dello schermo di raggio AE in Figura 3] come 1 a 275: perciò se il telescopio moltiplica le distanze in proporzione di 20 a 1, il vero rapporto del diametro di Giove al semidiametro del suo cerchio sarà come 1 a 5500 [275x20]*<sup>35</sup>.



**Fig. 4.** Cannocchiale in montatura equatoriale, obiettivo da 60 mm con distanza focale 700; oculare da 40 mm di focale: ingrandimento risultante 17.5. In questa sistemazione l'occhio sinistro guarderà Giove e i satelliti attraverso l'oculare e il destro li vedrà comparire sul cartone rigato (illuminato con una torcia elettrica). Si avvicina o allontana il cartone fino a sistemare Giove fra due righe e avere, così, l'unità di misura per le distanze Giove-satelliti.

L'appunto di Galileo si ferma qui; per giustificare i suoi numeri supponiamo che, ad esempio, avesse trovato di 4 mm il diametro di Giove sullo schermo a una distanza AE di

<sup>33</sup> Ferioli L., *Appunti di ottica astronomica*, Hoepli, Milano, 1987, p. 48.

<sup>34</sup> Per le nostre prove abbiamo usato una superficie piana di cartone, con righe parallele diverse, anziché un reticolo, eliminando qualche inconveniente qui descritto.

<sup>35</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte Seconda, p. 446.

1100 mm (4x275); allora dai suoi dati si può calcolare l'angolo sotto il quale vedeva il diametro apparente di Giove:  $\arcsin(1/5500) = 0^\circ.010417 = 37''.5$ . La simulazione a questa data fornisce il valore di  $44''.42$  per il diametro equatoriale di Giove; ma rendiamoci conto che è la prima volta che troviamo il diametro apparente di un pianeta valutato in base a delle misure strumentali, non *a occhio*.

Più avanti, oltre a ripetere questa valutazione condotta fino al risultato, Galileo ne svolge una seconda, il tutto con una rettifica (da 20 a 18) dell'ingrandimento del cannocchiale.<sup>36</sup> *Il giorno 21 gennaio 1612 osservai il diametro di Giove rispetto alla sua distanza dalla Terra essere come 1 a 275; poi il 9 giugno dello stesso anno fu come 1 a 291: e tutto ciò mediante il telescopio. Poiché in effetti il telescopio moltiplica le distanze nel rapporto 18 a 1, nella prima osservazione il rapporto della distanza da Terra rispetto al diametro dell'astro fu come 4950 a 1; nella seconda in realtà come 5238 a 1. Pertanto mediante le tavole dei seni si trova che il diametro di Giove nella prima osservazione sottendeva un angolo di  $0^\circ 0' 41'' 37'''$ , nella seconda invero  $0^\circ 0' 39'' 24'''$ .* Ancora la simulazione fornisce per il 9 giugno un diametro di  $34''$ .

Per concludere, la prima applicazione del dispositivo galileiano alle osservazioni celesti fu relativa al diametro di Giove e il primo risultato risale al 21/1/1612.

---

<sup>36</sup> Galilei G., (op. cit.), Vol. 3, Parte Seconda, p. 859.

## Appendice. Osservazioni di p. Benedetto Castelli

Orari dal tramonto a Firenze, corretti rispetto al TMEC per la costante locale (+15<sup>m</sup>) e per l'equazione del tempo, così da fare il confronto col simulatore di planetario "Perseus". Distanze in semidiametri misurate dal bordo del disco di Giove.

Riferimenti				C	P	diff.	C	P	diff.	C	P	diff.	C	P	diff.
autore	giorno	mese	tram. h m	Io			Europa			Ganimede			Callisto		

Anno 1612. Osservazioni di C. tratte da appunti di Galileo (*Le Opere*, Vol. III, Parte 2<sup>a</sup>, p. 447-8).

C	05	02	3 <sup>h</sup> 50	3.7	4.5	<b>0.8</b>	no	0.7		3	3.2	<b>0.2</b>	10	8.9	<b>-1.1</b>
C	06	02	4	4.5	4.8	<b>0.3</b>	7	8.3	<b>1.3</b>	12.5	13.9	<b>1.4</b>		co.I	<b>0.3</b>
C	07	02	3 <sup>h</sup> 40	3	4.4	<b>1.1</b>	no	1.3		5	8.2	<b>3.2</b>	8	13.8	<b>5.8</b>
C	"	"	5 <sup>h</sup> 20	3	3.6	<b>0.6</b>	1	2.4	<b>1.4</b>	6	7.4	<b>1.4</b>	10	14.3	<b>4.8</b>
C	25	02	1	no	1		2.7	3.9	<b>1.2</b>	8	7.6	<b>-0.4</b>	20.7	22.3	<b>1.6</b>
C	26	02	0 <sup>h</sup> 50		oc.		6	6.1	<b>0.1</b>	3	3	<b>0</b>	22	25.1	<b>3.1</b>

Lettera del 2/3/1612 (*Le Opere*, Vol. XI, p. 278) di C. a Galileo che ne aveva fatte nella stessa notte (G): dal paragone rispetto a "P" si conclude che entrambi operavano con dispositivi simili.

C	28	02	1 <sup>h</sup>	4	3.9	<b>-0.1</b>	no	2.5		10	12.2	<b>2.2</b>	14	20.2	<b>6.2</b>
C	"	"	2 <sup>h</sup>	4.5	4.3	<b>-0.2</b>	no	1.9		12	11.9	<b>-0.1</b>	16	19	<b>3</b>
C	"	"	4 <sup>h</sup>	4	4.8	<b>0.8</b>	no	0.8		10	11.4	<b>1.4</b>	15.3	18.5	<b>3.2</b>
C	"	"	5 <sup>h</sup> 30	3.5	4.9	<b>1.4</b>		tr.	<b>0</b>	10	10.9	<b>0.9</b>	15.5	18.1	<b>2.6</b>
C	"	"	6 <sup>h</sup> 20	2	4.8	<b>2.8</b>		tr.	<b>0</b>	8	10.6	<b>2.6</b>	12	17.8	<b>5.8</b>
G	28	"	0 <sup>h</sup> 20	3.5	3.3	<b>-0.2</b>	3.5	3.3	<b>-0.2</b>	11	12.5	<b>1.5</b>	17	19.6	<b>2.6</b>
G	"	"	3 <sup>h</sup> 30	5	4.7	<b>-0.3</b>	0.7	1.2	<b>0.5</b>	11	11.7	<b>0.7</b>	16	18.8	<b>2.8</b>
C	29	02	0 <sup>h</sup> 40	4	4.7	<b>0.7</b>	6.3	8.2	<b>1.9</b>	2	2.2	<b>0.2</b>	9.3	11.8	<b>2.5</b>
C	"	"	? <sup>h</sup> 30	Dati inutilizzabili perché manca l'indicazione dell'ora											
G	29	02	0 <sup>h</sup> 20	3.5	4.5	<b>1</b>	6.3	8.1	<b>1.8</b>	2.2	2.6	<b>0.4</b>	10	12.1	<b>2.1</b>
G	"	"	2 <sup>h</sup>	3.8	4.8	<b>1</b>	6.8	8.4	<b>1.6</b>	1.5	1.7	<b>0.2</b>	10.2	11.5	<b>1.3</b>
C	01	03	0 <sup>h</sup> 50	4.5	4.8	<b>0.3</b>		oc.	<b>0</b>	6.9	8.3	<b>1.4</b>	no	2.3	
C	"	"	2 <sup>h</sup> 30	3.5	4.3	<b>0.8</b>		oc.	<b>0</b>	7.5	9	<b>1.5</b>	no	1.6	
C	"	"	3 <sup>h</sup> 30	2	3.9	<b>1.9</b>		ec.		6.5	9.4	<b>2.9</b>	no		
C	"	"	5 <sup>h</sup> 20	2.3	2.8	<b>0.5</b>	0.7	1.7	<b>1</b>	8.3	10.1	<b>1.8</b>	no		
C	"	"	6 <sup>h</sup>	2	2.4	<b>0.4</b>		co.I	<b>0.4</b>	9	10.3	<b>1.3</b>	no		
G	01	03	0 <sup>h</sup> 40	4.5	4.9	<b>0.4</b>		oc.	<b>0</b>	7.3	8	<b>0.7</b>	2.3	2.6	<b>0.3</b>
G	"	"	2 <sup>h</sup>	4	4.6	<b>0.2</b>		oc.	<b>0</b>	8	8.6	<b>0.6</b>	2	2.1	<b>0.1</b>
G	"	"	4 <sup>h</sup> 10	3	3.8	<b>0.8</b>	no	0.7		9	9.5	<b>0.5</b>	no	1.1	
G	"	"	5 <sup>h</sup> 20	2.5	3.1	<b>0.6</b>	0.8	1.5	<b>0.7</b>	9.5	9.9	<b>0.4</b>		0.7	

Lettera del 2/2/1613 (*Le Opere*, Vol. XI, p. 478).

C	01	02	11 <sup>h</sup>	2	3	<b>1</b>	3.7	4.6	<b>0.9</b>	12	12	<b>0</b>	14	13.5	<b>-0.5</b>
---	----	----	-----------------	---	---	----------	-----	-----	------------	----	----	----------	----	------	-------------

Lettera del 10/12/1613 (*Le Opere*, Vol. XI, p. 604).

C	04	12	11 <sup>h</sup>	4	4.9	<b>0.9</b>		oc.	<b>0</b>	8	10.4	<b>2.4</b>	no		
---	----	----	-----------------	---	-----	------------	--	-----	----------	---	------	------------	----	--	--

### Legenda

C = osservazioni del Castelli; G = osserv. di Galileo; P = dati del "Perseus"; diff.= differenze.

Situazioni particolari dei satelliti: oc. = occultato; ec. = eclissato; tr. = in transito; co. = congiunto con altro satellite; no = satellite in nessuna di queste situazioni, ma non fu rilevato.

Nei casi di occultazioni e transiti si è presunta una differenza 0. Ciò non vale per le eclissi.