

# Abstract

Bernard R. Goldstein

## Levi ben Gerson on the Sources of Error in Astronomy

Levi ben Gerson (Gersonides, d. 1344) was an outstanding medieval astronomer whose contributions met the highest standards of the day. Chapter 58 of his *Astronomy* is devoted to his reasons for doubting some of the observations, as well as the consequences drawn from them, by ancient and medieval astronomers. His discussion reveals a profound understanding of the sources of error in astronomical observations, based in part on his own experience of making such observations. It was most unusual in the Middle Ages to cast doubt on ancient astronomical observations, but Levi did not hesitate to do so and avoided the common medieval practice of seeking ways to harmonize ancient data with more recent findings. The Hebrew text of this chapter is presented here, together with a translation and commentary.

Bernard R. Goldstein

# Levi ben Gerson on the Sources of Error in Astronomy

## Introduction

Levi ben Gerson, also known as Gersonides (1288–1344), was an outstanding medieval astronomer and mathematician as well an eminent Jewish philosopher.<sup>1</sup> His *Astronomy* forms Book 5, Part 1, of *The Wars of the Lord*, but it can stand as an independent work and, indeed, is preserved in manuscripts apart from the rest of his philosophical *magnum opus*. Among the many unusual features of Levi's *Astronomy* (with respect to other medieval treatises on scientific matters) is an emphasis on sources of error; they are treated in several chapters that I published previously, notably chapters 3, 11, and 17.<sup>2</sup> In this paper the focus will be on chapter 58, concerning “doubts” about the solar model, with an edited text, translation, and commentary. The topics treated in

- 1 See M. Kellner, “Bibliographia Gersonideana: An Annotated List of Writings by and about R. Levi ben Gershom,” pp. 367–414 in G. Freudenthal, ed., *Studies on Gersonides: A Fourteenth-Century Jewish Philosopher Scientist* (Leiden: Brill, 1992); idem, “Bibliographia Gersonideana, 1992–2002,” *Aleph* 3 (2003): 345–374. See also B. R. Goldstein, “Levi ben Gerson's Contributions to Astronomy,” pp. 3–19 in Freudenthal, *Studies on Gersonides*.
- 2 B. R. Goldstein, *The Astronomy of Levi ben Gerson (1288–1344)* (New York: Springer-Verlag, 1985).

Chapter 58 are: the period of solar motion; the obliquity of the ecliptic; the solar eccentricity; the motion of the solar apogee; the apparent solar diameter; the motion of the fixed stars; lunar motion with respect to solar motion; ancient observations of solstices and equinoxes; and the effect of clouds and exhalations. As a rule, Levi does not estimate the size of the error, although in some instances he believes he can do so by comparing observations made by different astronomers. He also excludes some attempts to harmonize divergent results that require motions which are implausible (e.g., §19). Characteristic of Levi's *Astronomy* are sharp criticisms of Ptolemy, unusual among medieval astronomers. In Chapter 58, Levi says, for example, "[Ptolemy's statement] is manifestly false" (§18; see also §§17–25, 30–33). Other passages where Ptolemy is strongly criticized are found in chapters 17,<sup>3</sup> 43,<sup>4</sup> and 46.<sup>5</sup> In general, medieval astronomers were more likely to modify ancient astronomical theories than to doubt ancient observations. Levi, however, finds fault with both the observations and the theories of his predecessors.

The Hebrew text is based on three manuscripts: א (MS Paris BNF héb. 724), ב (MS Paris BNF héb. 725), and ג (MS Naples III F 9).<sup>6</sup> Division into paragraphs, the numbering of sentences, and punctuation are due to the editor. Folio numbers in each of the manuscripts are indicated in brackets in the edited text. Minor differences in orthography among the manuscripts have not been noted in the apparatus.

### Translation

Levi ben Gerson, *Astronomy*, Chapter 58:

*In it we record many doubts that may be thought to befall our remarks concerning the model for the Sun.*

Chapter 58. [1] There is great doubt in the determination of the period of rotation of the mean solar motion. [2] Ptolemy found the length of time for one rotation—based on the 285 years between

himself and Hipparchus, and Hipparchus also found [the same result] based on the 286 years between him and an ancient observation—to be 365¼ days less 1/300 of a day, that is, they found this diminution to be 1 day in 300 years. [3] Al-Battānī came about 720 years after him [i.e., Ptolemy], and he found the length of time for one rotation of the Sun to be less than what Ptolemy recorded such that the diminution in 300 years is about 2 days 20 hours, that is, 1 day in about 106 years. [4] Afterwards, about 480 years later, we found that the motion of the Sun was slower than what al-Battānī found by about 0;48,25°, positing the solar correction according to the solar eccentricity as seen from solar and lunar eclipses that we determined by observation, as will be explained, God willing, in what follows. [5] Therefore, the diminution in 480 years is 3 days 17;11 hours. [6] [It follows that] the diminution is about 1 day in 129 years and 63 days, which agrees approximately with what those who made careful observations [*ha-medaqdeqim*] have found by this computation in more than 200 years since the time of al-Battānī, for they found this diminution to be 1 part in 131 of a day, as is clear from the words of the scholar, R. Abraham Ibn Ezra in his *Book of Nativities*; al-Šūfī and Ibrahīm Azarquiel after him found similar results, as [Ibn Ezra] recorded. [7] Thus, a serious doubt enters this investigation.

3 Goldstein, *Astronomy of Levi ben Gerson*, pp. 105–107.

4 J. L. Mancha and G. Freudenthal, "Levi ben Gershon's Criticism of Ptolemy's Astronomy," *Aleph* 5 (2004): 35–167.

5 B. R. Goldstein, "A New Set of Fourteenth Century Planetary Observations," *Proceedings of the American Philosophical Society* 132 (1988): 371–399, on pp. 385–387.

6 For a description of the manuscripts, see B. R. Goldstein, *The Astronomical Tables of Levi ben Gerson* (New Haven: Connecticut Academy of Arts and Sciences, 1974), pp. 74–77.

[8] Moreover, concerning the inclination of the poles of the ecliptic from the poles of the equator, there is doubt and perplexity which do not disappear. [9] Ptolemy and the Ancients found the obliquity of the orb of the Sun from the orb of the equator when it is at the beginning of Cancer or Capricorn to be  $23;51^\circ$ , according to what they reported. [10] Later, al-Battānī found the amount of this inclination to be  $23;35^\circ$ , and so did all those who came after him, approximately; indeed, those who made careful observations only found a diminution from his value of at most  $0;2^\circ$ . [11] And this was also our result, as we mentioned in chapter 13 and 15 of this Part [of our treatise].

[12] Moreover, there is doubt that does not disappear in the solar eccentricity because Ptolemy found the maximum correction in its motion to be about  $2;23^\circ$ , according to what he reported. [13] Those who came after him found it to be less than  $2^\circ$ , [an amount] on which, as we have seen, they agreed. [14] But, on the basis of observing the excess in the apparent size of the Sun at the perigee of its orb over its amount at the apogee of its orb, we found the maximum solar correction to be  $0;8^\circ$  greater than  $2^\circ$ . [15] This shows that the eccentricity is  $2;14$ , as we explained; indeed, this eccentricity indicates that, if the solar motion takes place about its center, the maximum correction is  $2;8^\circ$ . [16] Also, we found it in close agreement with what we see in the times of the eclipses which we determined by observation.

[17] Moreover, concerning the motion of the solar apogee there is a doubt which is not insignificant. [18] For Ptolemy imagined that he made clear, on the basis of ancient observations, that the solar apogee does not move at all; however, when one examines this statement, it is evident that it is manifestly false. [19] It is not plausible to assume that the apogee does not move for a long time and later moves uniformly for a long time, for there is no model from which this can follow, as is clear with a little examination from what we have already mentioned. [20] Unless, by God, one assumes that it is motionless by its essence, but still starts to move thereafter; this, however, is patently a false

assumption, as has been made clear in natural science concerning the nature of celestial bodies.

[21] Moreover, there is much doubt and perplexity concerning the apparent solar diameter with respect to the circle traced by its motion. [22] Ptolemy made clear, on the basis of his observations, according to what is [generally] believed, that the size of the apparent solar diameter at greatest distance is  $0;31,10^\circ$ . [23] But we found its size there does not reach  $0;28^\circ$ . [24] Since this is so, how is it possible that [*lit.* would that I might know if] the Sun's orb in ancient times was closer to the Earth at greatest and least distances and then at a later time that orb increased in size in all its parts such that it became larger, with the Sun being always farther from our sight than it was in Antiquity; or [how is it possible] that the spherical body of the Sun was at that time larger and later it diminished and became smaller? [25] This is the most absurd of falsehoods that can possibly be imagined, as has been made clear in natural science concerning the nature of this celestial body.

[26] Similarly, it is clear that it is not possible to claim that the reason why the greatest distance of the solar orb was closer to the Earth [in Antiquity] than it is now is that the center of the solar orb moves on a small circle that sometimes makes it approach the Earth and sometimes moves it away [from the Earth], such that in our time the center of the solar orb is farther from the Earth than it was at the time of Ptolemy. [27] If this were true, it would necessarily follow that the distance of the perigee would be much closer to us than the distance of the apogee at the time of Ptolemy's observation. [28] It would then follow of necessity that the size of the solar diameter would appear greater to us at perigee than what Ptolemy found for its size at apogee, and this is contrary to what is found by observation. [29] For we only found the size of the solar diameter at perigee to be  $0;30^\circ$ . [30] Thus, it appears that Ptolemy's conclusion [*lit.* what Ptolemy explained] does not derive from true observations [*mabbaṭim 'amittiyyim*]. [31] We will explain what follows from this in the discussion of the lunar model.

[32] In general, the reason for this error, as will be explained there, is that he set the maximum inclination of the lunar [orb] at  $5^\circ$  whereas it is only  $4\frac{1}{2}^\circ$ , as we will demonstrate there, based on our observations that are the most accurate [*meduqdaqim*] possible.

[33] Similarly, it is evident that the eccentricity of the solar orb recorded [by Ptolemy] is impossible, for it is impossible that it was then as Ptolemy stated and that later this center approached the Earth while the distance [of apogee and perigee] receded [*we-šav*] in the way we described.

[34] Similarly, it is not possible that the obliquity of the ecliptic to the equator in Antiquity was greater than it is now unless its poles move on a small circle. [35] But if it is thus assumed, it is not possible for it to be for all this long duration [i.e., in recent times from al-Battānī to the present day] at this smaller inclination [of about  $23;35^\circ$ ], whereas in all of Antiquity until Ptolemy's time it had an inclination [of about  $23;51^\circ$ ] that, as Ptolemy reported, was agreed by the Ancients; rather, sometimes it should have increased gradually and at other times it should have decreased gradually. [36] Moreover, if the matter were so, it would follow of necessity that the same motion be ascribed to the poles of the lunar orb in such a way for them to make the Moon always incline to the circle traced by the Sun on the ecliptic with the same inclination such that the circumstances of solar and lunar eclipses that follow from [this assumption] would always be the same [as those that follow without this assumption], as is evident concerning them. [37] But this is far fetched, for the Moon has no motion that is not completed in a short time interval, as is clearly the case concerning it. [38] And if it had this motion, it would have a slow motion which left no trace either in the motion of its apogee or in the motion of its node. [39] But it is inappropriate to posit this, for there is nothing here to require introducing such a motion for the Moon, and it is inappropriate to put [in an astronomical model] a multiplicity of devices unless they are necessary. [40] All this demonstrates that error [*ta'ut*] has entered

these observations.

[41] Also, I cannot fathom how it is possible to posit that the Sun moves slowly for a long time and then swiftly [for a long time]. [42] It is evident that this is impossible for a celestial body; rather, the variation [in velocity] in different sections of a single rotation according to its positions in this rotation can only be due to one of the reasons that we reported, for there is no [component of] motion in the solar motion that completes a circuit in more than the period we recorded except for the motion of its apogee. [43] If the matter were so, it would follow that this [variation] is due to the motion of the apogee which takes a very long time to complete [a circuit], as is clear concerning it. [44] For this to be imagined, this motion would have to be slower at the time of Hipparchus and Ptolemy than at the time of al-Battānī and in our time. [45] And if this were so, this variation itself would have to be found in the motion of the apogee; however, we did not find it to be the case. [46] For al-Battānī found the excess in the motion of the apogee over what Ptolemy assumed for it to be greater than what he found for the excess in the motion of the Sun by about  $5\frac{1}{2}^\circ$ , although [for this computation] we had to assume that Ptolemy agreed that the apogee moves with the amount of the motion of the fixed stars, which is  $1^\circ$  in 100 years according to Ptolemy. [47] Moreover, we computed the excess in the motion of the apogee from the time of al-Battānī to our time, at the rate of  $1^\circ$  in 100 years, to be about  $6;12^\circ$ , but we found the excess over the motion of the Sun according to Ptolemy's hypothesis to be only  $2;5,8^\circ$ .

[48] Moreover, this motion of the Sun [cannot] vary in this way, for the mean lunar elongation from the Sun always takes place in the way that Ptolemy assumed—so much so that al-Battānī did not have to correct anything in his calculations over the long time interval between Ptolemy and himself. [49] And we too found from our observations that it is approximately correct. [50] But, it would follow of necessity that if this variation were in the mean motion of the Sun, there would

likewise be a variation in the lunar motion and, if so, it would follow of necessity that there would be a slow anomalistic motion for the Moon in the same way as was assumed for the Sun. [51] However, it is inappropriate to make this assumption, for we do not observe a motion in the Moon that would lead us to ascribe to it a slow motion; and this will be explained more completely in the discussion of the Moon.

[52] Moreover, it will also be made clear, God willing, in the discussion of the motion of the fixed stars that al-Battānī found their motion about the poles of the ecliptic to be  $1^\circ$  in 66 Egyptian years during about 720 years between the observation of Ptolemy and his own observation. [53] We too found it to be about the same amount for about 480 years between the observation of al-Battānī and our observations, the difference being no greater than what can be ascribed to approximation in the observation. [54] This shows us, without any doubt, that the motion of the fixed stars is uniform, that is, it always takes place in the same way.

[55] We observed the Moon in the manner of ancient observations, [namely,] when the Moon occulted a fixed star, and we computed the position of the fixed star at that time according to what follows from the amount of the motion that we found for them. [56] Thereby we determine without much difficulty the mean position of the Moon at the time of this observation, once we know the appropriate correction due to lunar anomaly and due to lunar parallax, for the amount of time for the Moon to complete its motion in anomaly has already been so carefully established that we do not find a perceptible error in it in the long time interval between us and the Ancients who determined the amount of this motion. [57] When we determine the amount of the lunar elongation from the Sun at the time of this observation on the basis of the computation upon which Ptolemy and the Ancients agreed and which was found to be correct until today, we can then determine the mean position of the Moon at the time of this observation. [58] However, we cannot do so before we complete the discussion

of the amount of the correction for the motion in anomaly and [the discussion of] the amount of lunar parallax. [59] For this reason we postpone the discussion of this matter until we complete the discussion of these corrections, [namely,] in the discussion of the lunar model.

[60] At this juncture we cannot determine the amount of the motion of the Sun unless we take as the starting point of our investigation the ancient observations in which the Sun was seen at one of the solstices or one of the equinoxes. [61] However, we should by no means take as certain that these observations are correct. [62] This will be evident from what I say, namely, you will find that a considerable error has entered into the observations recorded by Ptolemy, as is clear from his discussion there. [63] It seems that this is why Ptolemy said that one should not seek to get his computations to agree with all observations. [64] It is clear that if these observations were correct then, necessarily, a correct computation of the motion of the Sun would have to agree with all those observations, for it is [surely] appropriate that perception be not at variance with truth at any time.

[65] For many reasons I think that error already entered the observations that the Ancients used for finding the times of equinoxes and solstices. [66] For solstices the matter is clear since the instrument of the astrolabe is not appropriate for determining them, given the small [change] in declination [at that time]. [67] For equinoxes [it is also clear], for it is impossible to determine them since [this determination depends on finding] the altitude of the Sun [at that time, and this cannot be known] unless one first knows the altitude of the pole for that place [on Earth]. [68] And the altitude of the pole can only be determined from the solar altitude at one of the solstices, [and this cannot be known] unless one first knows the amount of the obliquity of the ecliptic to the equator. [69] The Ancients did not determine that amount [correctly], as is clear from what they agreed upon, for they set the obliquity equal to  $0;16^\circ$  greater than the proper amount.

[70] Moreover, there may be an error in the construction of the

instrument, as we explained at the beginning of this treatise, and it will produce a large error. [71] Indeed, as for the brass ring set up in Alexandria, with which many of these observations were made, we cannot be certain that it was free of error in its construction. [72] For the ring has to be in the plane of the equator but, as we mentioned, the Ancients did not determine the amount of the obliquity which belongs to the Sun, which is the starting point for determining the altitude of the pole at any place and, in turn, it is starting point for finding the altitude of the equator at any place, and this is evident. [73] Moreover, even if we assume that it [the ring] had been placed at the appropriate altitude, according to the altitude of the equator at Alexandria, there may still be an error due to the foundation [supporting the ring] with respect to the directions of east and west, i.e., if the plane [of the ring] is not set exactly on the straight line connecting the rising of the head of Aries or the head of Libra to its setting, an error will occur in this observation, that is, it may happen that the Sun will be ahead of the equinoctial point or behind it when light is cast on the two surfaces of the ring. [74] This will not escape the [attentive] reader of this book.

[75] Moreover, since this observation only takes place in a single moment, it is possible that clouds or exhalations will intervene at that moment between the ray of the Sun and us, causing the ray to be deflected away from its [proper] place, an error in the observation may occur. [76] But our procedure for these observations makes this impossible, for we have repeated this observation many times for a solstice or an equinox. [77] Thus we can distinguish between a correct and an incorrect observation. [78] For these reasons, or some of them, you will find in the observations recorded by Ptolemy some things that cannot possibly conform to the truth.

[79] The error that entered into the observations of the Ancients will be evident to you from what Ptolemy stated, for he said that man does not have the capacity to determine the moment when the Sun enters the beginning of Aries. [80] Neither ancient nor recent [astronomers]

have determined it. [81] If he [Ptolemy] was incapable of determining the moment when the Sun enters the point of the equinoxes with these instruments which he used for observation, he was similarly incapable of determining the moment when the Sun enters the point of the solstices. [82] This being so, it is evident from his words that error entered into these observations, and he was unable to distinguish between incorrect and correct observations.

[83] However, our observations should be the starting point for finding the truth in this matter for, when accurate observations of the same kind as ours are made long after our time, the amount of the diminution from 365¼ days will be known without any doubt. [84] Nevertheless, we can state clearly in this place, with respect to the ancient observations which are approximate, that what we determined is in approximate agreement with those observations. [85] This is already evident in Hipparchus's accurate observation of the vernal equinox, cited in connection with a [lunar] eclipse [in the same year], that took place in the 43rd year of the third Philippan [read: Kallippic] cycle on the 29th day of Mesore [read: Mechir], at midnight, during the night whose dawn was day 30 [of that month], i.e., year 189 after the death of Alexander. [86] And 274 years later Ptolemy found, as he reported, that the diminution from 365¼ days was 23 hours, and al-Battānī found, as is evident from his computation, that in 720 years the diminution was 6 days 19;20 hours. [87] Combining all these results, the diminution in 994 years amounts to 7 days 18;20 hours, which implies 1 day in 128 years, and this agrees approximately with what we found from the time of Ptolemy to the time of our observations, assuming that al-Battānī's observation was correct.

[88] In general, there is no way to clarify this [matter] completely without using ancient lunar observations, as we mentioned, for they allow us to determine the approximation in the observations of Ptolemy and al-Battānī. [89] Nevertheless, this observation will lead us in some way to the result that the joint motion of the Sun and the motion of the

apogee progress both then and now in the same way [i.e., uniformly].  
[End ch. 58]

### Commentary

§§1–7. Levi correctly cites Ptolemy’s value for the length of the solar year,  $365\frac{1}{4} - 1/300$  days which Ptolemy also ascribes to Hipparchus.<sup>7</sup> He then remarks that al-Battānī (*fl.* 900) determined the solar year to be about  $365\frac{1}{4} - 1/106$  days.<sup>8</sup> The *zij* (a set of astronomical tables with instructions) of al-Battānī is dated ca. 880 and Ptolemy’s *Almagest* was composed ca. 150 which means that the time difference is about 730 years rather than Levi’s claim that it was 720 years.<sup>9</sup> Al-Battānī himself says that there were 743 years between a solar observation of Ptolemy and his own, and that the year-length is  $365;14,26d$ ,<sup>10</sup> which is equivalent to  $365\frac{1}{4} - 1/106$  d, for  $365;15 - 365;14,26 = 0;0,34 = 1/105;53 \approx 1/106$ . Levi then gives his own estimate of the length of a year as  $365\frac{1}{4} - 1/(129 + 63/365)$  days in close agreement, he notes, with Abraham Ibn Ezra (d. 1167), al-Šūfī (d. 986), and Azarquiel (d. 1100). In his *Book of Nativities*, cited by Levi, Ibn Ezra gives year-lengths according to many Muslim scholars (including al-Battānī), but he does not specifically mention Azarquiel or al-Šūfī.<sup>11</sup> In his *De rationibus tabularum* Ibn Ezra gives an account of year-lengths according to his Muslim predecessors: for some it is  $365\frac{1}{4} - 1/106$  days, and for others it is  $365\frac{1}{4} - 1/130$  days.<sup>12</sup> The year-length,  $365\frac{1}{4} - 1/131$  days, does not occur in Ibn Ezra’s *Book of Nativities* or in his *De rationibus tabularum*, but it is found in the first version of his *Book of the World* (*Sefer ha-‘Olam*) together with the names al-Šūfī and Azarquiel each of whom is praised as a careful observer (*medaqdeq*).<sup>13</sup> Thus it seems that Levi’s source was Ibn Ezra’s *Book of the World* rather than his *Book of Nativities*. Levi’s discussion of his own observations of solar and lunar eclipses, mentioned in §4, is found in chapters 80 and 100.<sup>14</sup>

§§8–11. Ptolemy’s value for the obliquity of the ecliptic (the angle between the celestial equator and the ecliptic) is  $23;51,20^\circ$ , whereas al-Battānī found it to be  $23;35^\circ$ .<sup>15</sup> Levi’s value,  $23;33,8^\circ$ , agrees with that of Abraham Ibn Ezra.<sup>16</sup> In chapters 13 and 15 of his *Astronomy* Levi

- 7 *Almagest*, iii.1; G. J. Toomer, *Ptolemy’s Almagest* (New York and Berlin: Springer, 1984), pp. 138–140.
- 8 On al-Battānī in medieval Hebrew astronomical texts, see B. R. Goldstein, “Astronomy in the Medieval Spanish Jewish Community,” pp. 225–241 in L. Nauta and A. Vanderjagt, eds., *Between Demonstration and Imagination: Essays in the History of Science and Philosophy Presented to John D. North* (Leiden: Brill, 1999), on p. 226. This article is also available online at: <http://www.pitt.edu/~brg/>.
- 9 C. A. Nallino, *Al-Battānī sive Albatēnii Opus astronomicum*, 2 vols. (Milan: Reale Osservatorio di Brera in Milano, 1903–1907).
- 10 *Ibid.*, 1: 42.
- 11 Oxford, Bodleian Library, MS Add. Qu. 160 [Neubauer No. 2518], ff. 112b–133b; I am most grateful to Shlomo Sela for providing me with a transcription of this text.
- 12 J. M. Millás, ed., *El libro de los fundamentos de las Tablas astronómicas de R. Abraham Ibn ‘Ezra* (Madrid and Barcelona: Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1947), p. 76, translated in S. Sela, *Abraham Ibn Ezra and the Rise of Medieval Hebrew Science* (Leiden: Brill, 2003), pp. 282–283; see also Millás, *Fundamentos*, pp. 83 and 95.
- 13 J. L. Fleischer, *The Book of the World by Abraham Ibn Ezra* (1937; repr. Jerusalem: Makor, 1970), p. 10. Oxford, Bodleian Library, MS Add. Qu. 160 [Neubauer No. 2518], ff. 143b–144a: again I am most grateful to Shlomo Sela for providing me with a transcription of the text in this manuscript. For the distinction between the two versions of Ibn Ezra’s *Book of the World*, see Sela, *Ibn Ezra*, pp. 67–69.
- 14 B. R. Goldstein, “Medieval Observations of Solar and Lunar Eclipses,” *Archives Internationales d’Histoire des Sciences* 29 (1979): 101–156.
- 15 *Almagest* i.15; Toomer, *Ptolemy’s Almagest*, p. 72. Nallino, *Al-Battānī*, 2: 58.
- 16 Goldstein, *Astronomical Tables*, p. 96.



describes ingenious procedures for finding the solar parameters by observing the image of the Sun passing through a window that is cast on the wall or the floor of a room in a house.<sup>17</sup>

§§12–16. Ptolemy's value for maximum solar correction is  $2;23^\circ$ , as stated by Levi,<sup>18</sup> whereas al-Battānī found it to be  $1;59,10^\circ$ .<sup>19</sup> Levi's value of  $2;8^\circ$  (corresponding to a solar eccentricity of  $2;14$ : see §15) was later revised by him, on the basis of eclipse observations, to  $2;17^\circ$ .<sup>20</sup> Levi's observational procedure, using a camera obscura, is described in chapter 56.<sup>21</sup>

§§17–20. Levi argues that one cannot assume that the solar apogee was motionless for hundreds of years in antiquity and then moved uniformly in recent times, for this is contrary to the nature of celestial bodies. Hence, Ptolemy's claim that the longitude of the solar apogee is fixed cannot be maintained. Here Levi is following the Muslim tradition in which the solar apogee proceeds at the rate of the precession of the fixed stars.<sup>22</sup> For Levi's account of precession, see §§52–54, below. Azarquiel, however, introduced a third kind of year in addition to the tropical year (the return of the Sun to the vernal equinox) and the sidereal year (the return of the Sun to a fixed star) mentioned by his predecessors, namely, the anomalistic year (due to the proper motion of the solar apogee).<sup>23</sup> Ibn Ezra also discussed of the motion of the solar apogee and the corresponding anomalistic year.<sup>24</sup> However, Levi does not consider a proper motion of the solar apogee.

§§21–25. Levi's measurements of the apparent solar diameter are given in chapter 56: at Cancer  $0^\circ$  (near the solar apogee) it is  $0;27,51^\circ$  (rounded here to  $0;28^\circ$ ).<sup>25</sup> Ptolemy's value for the apparent solar diameter is  $0;31,20^\circ$ ,<sup>26</sup> rather than  $0;31,10^\circ$  as Levi remarks, and nothing is said in the *Almagest* about its variation at different distances. However, the variation in solar distance from 1160 terrestrial radii to 1260 terrestrial radii appears in Ptolemy's *Planetary Hypotheses*, written after the *Almagest*.<sup>27</sup> Hence, in this account the apparent solar diameter would also vary.

§§26–33. Levi argues that Ptolemy's values for various parameters are incompatible with those Levi took to be correct, and it follows that Ptolemy's observations are not reliable with respect to them. On the apparent sizes of the solar diameter determined with a camera obscura, see the comments on §§21–25, above. Many medieval astronomers, including Levi, preferred  $4;30^\circ$  for the maximum lunar latitude, rather than Ptolemy's  $5^\circ$ , for this parameter.<sup>28</sup>

17 Goldstein, *Astronomy of Levi ben Gerson*, pp. 86–101, 170–186.

18 *Almagest*, iii.15; Toomer, *Ptolemy's Almagest*, p. 167.

19 Nallino, *Al-Battānī*, 2: 81.

20 Goldstein, *Astronomical Tables*, pp. 93–95.

21 J. L. Mancha, "Astronomical Use of Pinhole Images in William of St. Cloud's *Almanach Planetarum* (1292)," *Archive for History of Exact Sciences* 43 (1992): 275–308, on pp. 289–297.

22 See, e.g., O. Neugebauer, "Thābit ben Qurra 'On the Solar Year' and 'On the Motion of the Eighth Sphere'," *Proceedings of the American Philosophical Society* 166 (1962): 264–299, on p. 266.

23 Azarquiel's *Treatise on the Sun* (*Maqālat al-Shams*) is not extant, but its contents are partially preserved by Ibn al-Hā'im (*fl.* 1200): see E. Calvo, "Astronomical Theories Related to the Sun in Ibn al-Hā'im's *al-Zij al-Kāmil fi'l-Ta'ālim*," *Zeitschrift für Geschichte der Arabisch-Islamischen Wissenschaften* 12 (1998): 51–111, pp. 54–56. See also J. Chabás and B. R. Goldstein, "Andalusian Astronomy: *al-Zij al-Muqtabis* of Ibn al-Kammād," *Archive for History of Exact Sciences* 48 (1994): 1–41, on p. 28.

24 Millás, *Fundamentos*, pp. 30, 79.

25 Mancha, "Pin-Hole Images," p. 293.

26 *Almagest* v.14; Toomer, *Ptolemy's Almagest*, pp. 254–256.

27 B. R. Goldstein, *The Arabic Version of Ptolemy's Planetary Hypotheses*. Transactions of the American Philosophical Society, 57.4 (Philadelphia: American Philosophical Society, 1967), p. 7.

28 For Levi's discussion of the maximum lunar latitude in chapter 74 of his *Astronomy*,

§§34–35. Levi argues that the observations of the ancients concerning the obliquity of the ecliptic cannot be reliable, for they would imply various impossibilities. If a parameter changes over time, it should change gradually, not abruptly.

§§36–40. If there were an effect in the solar motion, it should also be manifest in the lunar motion. But the absence of the effect in the lunar motion argues against positing it for the solar motion. Levi introduces a principle of simplicity in §39: “it is inappropriate to put [in an astronomical model] a multiplicity of devices unless they are necessary.”

§§41–47. An argument is given for the implausibility of abrupt changes in the solar motion. The time interval from Ptolemy to al-Battānī is 720 years and from al-Battānī to Levi is 480 years (see §4, above). Although the text in §§46–47 seems to be corrupt, the following interpretation of it may be plausible. At Ptolemy’s rate of  $1^\circ$  in 100 years, the motion of the apogee in 720 years would be  $7;12^\circ$ , whereas at al-Battānī’s rate of  $1^\circ$  in 66 years this motion would be  $10;55^\circ$ . In 480 years at Ptolemy’s rate the motion would be  $4;48^\circ$ , whereas at al-Battānī’s rate the motion would be  $7;16^\circ$ , or a difference of  $2;28^\circ$  (text:  $2;5,8^\circ$  in all three MSS; perhaps to be emended to  $2;28^\circ$ ). Moreover, in 1200 years ( $720 + 480$ ) from Ptolemy to Levi, this motion according to Ptolemy would be  $12^\circ$ , whereas according to al-Battānī it would be  $18;11^\circ$ , or a difference of  $6;11^\circ$  (text:  $6;12^\circ$ , for the time from al-Battānī to Levi!).

§§48–51. Again Levi argues that a variation in solar motion would affect the lunar elongation from the Sun, and this has not been observed.

§§52–54. Levi discussed the motion of the fixed stars, i.e., precession, in chapter 61 of his *Astronomy*.<sup>29</sup>

§§55–59. To assess ancient lunar observations Levi first needs to determine the corrections for lunar anomaly and the lunar parallax. These topics are discussed at length later in Levi’s *Astronomy*. Levi’s

dated and datable observations were quite numerous by medieval standards.<sup>30</sup> It is perhaps Levi’s experience as an observer that gave him confidence to criticize the observations of others.

§§60–74. Here Levi argues that the ancient observations of solstices and equinoxes are not reliable. First, the instruments were not sufficiently precise, and second that the geographical latitude (called “the altitude of the pole”) has to be known accurately in order to set up the instrument properly. In fact, Ptolemy’s value for the geographical latitude of Alexandria,  $30;58^\circ$ , was off by  $0;14^\circ$ , for the modern value is  $31;12^\circ$ .<sup>31</sup> Ptolemy’s value for the obliquity of the ecliptic,  $23;51^\circ$ , was off by  $0;16^\circ$  for, according to Levi, it should have been  $23;35^\circ$ , which was al-Battānī’s value (see §§10 and 69). Again, this means that Ptolemy’s instrument was not set up properly.<sup>32</sup> In §63 Levi asserts that, according to Ptolemy, one should not seek exact agreement of computations with observations. I have not found a passage where Ptolemy said this, but perhaps Levi had in mind the following: “Thus in these [solar] observations too there is no discrepancy worth noticing, even though it is possible for an error of up to a quarter of a day to occur not only

see B. R. Goldstein, “The Physical Astronomy of Levi ben Gerson,” *Perspectives on Science* 5 (1997): 1–30, on pp. 19–22. See also Chabás and Goldstein, “Andalusian Astronomy,” pp. 20–22.

29 B. R. Goldstein, “Levi ben Gerson’s Analysis of Precession,” *Journal for the History of Astronomy* 6 (1975): 31–41.

30 For a list of Levi’s dated and datable observations, see J. L. Mancha, “Levi ben Gerson’s Astronomical Work: Chronology and Christian Context,” *Science in Context* 10 (1997): 471–493, on pp. 490–492.

31 J. P. Britton, *Models and Precision: The Quality of Ptolemy’s Observations and Parameters* (New York and London: Garland, 1992), p. 5.

32 For a modern discussion of the errors in Ptolemy observations, see Britton, *Models and Precision*.

in the observations of solstices, but even in equinox observations.”<sup>33</sup> In §66 Levi calls attention to the small change in solar declination at the time of equinoxes and solstices. Indeed, at the time of an equinox the declination changes by about 1 minute of arc in an hour, and this is too small to be observed. At solstices the change in declination is much smaller and so it is too small to be observed as well. Thus, the precise time of a solstice or an equinox could not be accurately determined by the means available in Antiquity.

§72–74. Levi lists some of the sources of error in using the astronomical ring in Alexandria:<sup>34</sup> the altitude of the celestial equator is the complement in 90° of the altitude of the pole (the geographical latitude), and it is needed to set up the instrument properly; the east-west line may not be properly positioned in the horizontal plane due to a shifting of the foundation; and the plane of the ring may not be in its proper place. In §74 Levi praises the reader of his book, saying that he will understand the argument without further elaboration.<sup>35</sup>

§§75–78. In several places in his *Astronomy* Levi mentions that clouds or exhalations (*’edim*) may affect an astronomical observation. In this respect he depends on the theory of exhalations in Aristotle’s *Meteorology* which was translated into Hebrew by Samuel Ibn Tibbon,<sup>36</sup> and into Latin by Gerard of Cremona,<sup>37</sup> both based on the Arabic version.<sup>38</sup> To be sure, astronomical observations are not discussed in the *Meteorology*, and Levi was simply applying Aristotle’s theory. In brief, there are dry exhalations, associated with the fiery element, and moist exhalations, associated with the watery element, both of which rise from the Earth while remaining in the sublunary realm. The problem is that the term *’ed* in the Hebrew translation is used collectively for both kinds of exhalations as well as specifically for the moist exhalation.<sup>39</sup> Hence, it is not easy to determine whether Levi had both kinds of exhalations in mind or just the moist exhalation. We might try to resolve this issue by looking at the Latin translation of Levi’s *Astronomy* (to which Levi contributed in some way), and

we find that *vapor* corresponds to the Hebrew *’ed*.<sup>40</sup> But *vapor* in the Latin version of Aristotle’s *Meteorology* has the same ambiguity as *’ed* has in the Hebrew.<sup>41</sup> So this does not help. Moreover, in chapter 17 of Levi’s *Astronomy*, *’edim* are said to be responsible for the dimming of Mars (which was understood at the time to be a diminution of its apparent size), but in this case the *’edim* have to be those associated with the fiery element, for Levi asserts that they were ignited under the planet (when it was in opposition the Sun) to produce a comet, which is part of Aristotle’s theory of comet formation.<sup>42</sup> In fact, Levi

33 *Almagest*, iii.1; Toomer, *Ptolemy’s Almagest*, p. 134.

34 *Almagest*, i.12; a modern drawing of this instrument appears in Toomer, *Ptolemy’s Almagest*, p. 61.

35 Cf. Levi’s *Astronomy*, ch. 43, in Mancha and Freudenthal, “Levi ben Gershom’s Criticism,” pp. 102–103, 166.

36 R. Fontaine, *Otot ha-shamayim: Samuel Ibn Tibbon’s Hebrew version of Aristotle’s Meteorology* (Leiden: Brill, 1995).

37 P. L. Schoonheim, *Aristotle’s Meteorology in the Arabico-Latin Tradition* (Leiden: Brill, 2000).

38 On the Arabic tradition, see P. Lettinck, *Aristotle’s Meteorology and its Reception in the Arab World* (Leiden: Brill, 1999).

39 Fontaine, *Otot*, pp. 102–103.

40 For example, *’edim* occurs in chapter 17: for the Hebrew, see Goldstein, *Astronomy of Levi ben Gerson*, pp. 107, 236; for the corresponding Latin, see J. L. Mancha, “The Latin Translation of Levi ben Gerson’s *Astronomy*,” pp. 21–46 in Freudenthal, *Studies on Gersonides*, on pp. 32, 44 n. 27. For the use of *’ed* in chapter 11, see Goldstein, *Astronomy of Levi ben Gerson*, pp. 80, 258; for the corresponding Latin, see G. Dahan, “Les traductions latines médiévales des oeuvres de Gersonide,” pp. 329–368 in G. Dahan, ed., *Gersonide en son temps* (Louvain and Paris: Peeters, 1991), on pp. 357–358.

41 Schoonheim, *Arabico-Latin Tradition*, p. 82.

42 Aristotle, *Meteorology*, i.7; H. D. P. Lee, *Aristotle’s Meteorologica with an English*

initially considered that the cause of this diminution was thin clouds, but then discarded this hypothesis after observing the comet. Levi also remarks that all stars seem smaller (i.e., dimmer) near the horizon.<sup>43</sup> In his naturalistic explanation of the miracle of Hezekiah Levi invokes the intervention of *'edim* at the time when the shadow of the Sun appeared to move backwards on the steps of Ahaz (2 Kgs 20:8–11). The relevant part of Levi's comment on this passage is that "clouds that move under the Sun sometimes cause the ray (*niṣoṣ*) of the Sun to be displaced, and this is clearly perceptible. Hezekiah saw that the motion of the wind at that time, and some vapors (*'edim*) under the Sun that move easily, caused the shadow to return ten steps..."<sup>44</sup> In this case, it seems that the *'edim* are moist exhalations. An exhaustive study of this question would involve examining Levi's usages of *'edim* in his Biblical commentaries as well as in his supercommentary on Averroes's commentary on Aristotle's *Meteorology*, but this is beyond the scope of this paper.<sup>45</sup> On balance, it seems best to translate *'edim* simply as "exhalations."

§§79–82. Levi emphasizes the difficulty in determining the exact moment when the Sun enters an equinox or a solstice.

§§83–87. A sentiment similar to that in §83 is reported by Ḥabash al-Ḥāsib (ninth century) in the name of the caliph, al-Ma'mūn (813–833):

He [al-Ma'mūn] said: "Because of this the ancients differed concerning the circuits of the Sun.... It is necessary to continue to take this measurement with all exactitude, according to what the wise Ptolemy stated. He [Ptolemy] says in the *Almagest*, 'We have made the most exact determination of the circuits of the sun, according to what the interval between us and Hipparchus has taught us. It is necessary that he who comes after us throughout the epochs take measurements as we have done, and if they find an imperfection, they should correct it and not find it repugnant, for the matter is not determined with the utmost precision so that nothing be too much for it.'"<sup>46</sup>

Hipparchus's observation of the vernal equinox is dated 29 Mechir at midnight, 43rd year of the Kallippic cycle, i.e., 189 years after the death of Alexander, or –134 March 23/24.<sup>47</sup> Ptolemy reported that after 274 years the diminution from 365¼ was 23 hours.<sup>48</sup> Combining the results from Hipparchus to the time of al-Battānī, Levi says that the diminution in 994 years was 7 days 18;20 hours. Hence,

$$994y/(7d + 18;20h) = 994/7;45,50 \approx 128,$$

which implies one day in 128 years, as Levi reported. If we add 274 years to –134, the result for the date of Ptolemy is 140, which is quite reasonable. But if we then add 720 years to get to the date of al-Battānī, the result is 860 which is too early for his solar observations.

§§88–90. Levi concludes that the motion of the Sun and of the solar apogee is uniform, both in ancient times and recently.

*Translation* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 1962), pp. 53–55. See also Fontaine, *Otot*, pp. 40–41.

43 Goldstein, *Astronomy of Levi ben Gerson*, pp. 106, 188.

44 B. R. Goldstein, "Galileo's Account of Astronomical Miracles in the Bible: A Confusion of Sources," *Nuncius: Journal of the History of Science* 5 (1990): 3–16, on p. 8.

45 For discussion of some of these issues, see S. Klein-Braslavy, "Gersonides' Use of the *Meteorology* in his Accounts of some Biblical Miracles," in this volume, pp. 241–313.

46 Y. T. Langermann, "The Book of Bodies and Distances of Ḥabash al-Ḥāsib," *Centaurus* 28 (1985): 108–128, on p. 126. Cf. *Almagest*, iii.1; Toomer, *Ptolemy's Almagest*, 136–137.

47 *Almagest*, iii.1; Toomer, *Ptolemy's Almagest*, p. 135. The modern scientific convention is to use negative numbers for years prior to the epoch of the calendar rather than BCE, where year 0 corresponds to 1 BCE and year –134 corresponds to 135 BCE.

48 *Almagest*, iii.1; Toomer, *Ptolemy's Almagest*, p. 138.

בקירוב, לא מצאו המדקדקים בזה מהחסרון כי אם ב' דקי'. [11] ובזה מצאנו אנחנו כמו שזכרנו בפ"ג מזה החלק ובפ"ו<sup>6</sup> ממנו.

[12] וגם כן הנה בענין יציאת מרכז גלגל<sup>7</sup> השמש מן הספק מה שלא יעלם, וזה כי בטלמיוס מצא התקון התכליתי אשר בתנועתו ב' מעלו' וכ"ג<sup>8</sup> דקי' בקירוב לפי מה שספר מזה. [13] והבאים אחריו מצאוהו פחות מב' מעלו' לפי מה שראינו שהסכימו עליו מזה. [14] ואנחנו מצאנו בתיקון התכליתי<sup>9</sup> לשמש יותר משתי מעלו' כמו ח' דקי' מצד מה שמצאנו במבט מיתרון השיעור לשמש בהיותו בשפל גלגלו על שיעורו הנראה בהיותו בגובה גלגלו. [נ 222] [15] כי זה ממה שיראה שיציאת המרכז היא ב' מעלו' וי"ד דקי' כמו שבארנו, וזה יורה אם היתה תנועת השמש סביב מרכזו שהתקון הוא בתכליתו<sup>10</sup> כמו ב' מעלו' וח' דקי'. [16] וזה גם כן מצאנוהו מסכים בקירוב למה שנראה מעת הקדירות אשר עמדנו עליהם במבט.

[17] וגם כן הנה בענין תנועת הגובה בשמש<sup>11</sup> יפול ספק אינו מעט. [18] וזה שבטלמיוס<sup>12</sup> ידמה שבאר מהמבטים הקודמים שגובה השמש היה בלתי מתנועע כלל, אלא שזה המאמר כשיעוין בו יראה היותו מבואר הבטול. [19] וזה כי אין ראוי שיונח הגובה זמן ארוך בלתי מתנועע, עוד ישוב אחר זה להתנועע זמן ארוך תנועה שוה, כי לא תמצא תכונה ימשך<sup>13</sup> ממנה זה כמו שיתבאר ממה שקדם עם מעט עיון. [20] האלהים אם לא שנניח שיהיה בזולת תנועה כלל בעצמותו ועוד ישוב אחר זה להתנועע, והיא הנחה מבוארת הבטול לפי מה שנתבאר בטבעיות מטבע הגרמים השמימיים.

[21] וגם כן הנה בענין קוטר השמש הנראה מהעגולה שירשמה בתנועתו מהספק והמבוכה הרבה. [22] וזה שבטלמיוס באר ממבטיו לפי מה שיחשב ששיעור קוטר השמש יראה בהיותו במרחק הרחוק ל"א דקי' וי' שניים. [23] ואולם אנחנו מצאנו שיעורו שם בלתי מגיע לכ"ח דקי'. [24] וכאשר היה זה כן מי יתן ואדע אם היה השמש בזמן [נ 223 א]

- 6 פנ: ובפ"ו: ק: ובפרק השלשה עשר.  
7 פק: גלגל; נ: לגלגל.  
8 פנ: וכ"ג; ק: וכ"ד.  
9 ק: התיקון התכליתי; פנ: התכלית.  
10 פק: בתכליתו; נ: בתכלית.  
11 קנ: הגובה בשמש; פ: גובה השמש.  
12 קנ: שבטלמיוס; פ: כי בטלמיוס.  
13 קנ: ימשך; פ: יונח.

הנ"ח. נזכור בו ספקות רבות יחשב שיפלו במה שיתבאר מדברינו מעניני השמש

\* \* \*

## הפרק החמישים ושמונה

[נ 221 ב, פ 107 א] [1] ואולם בשווי שיעור<sup>1</sup> זמן סבובי תנועת השמש<sup>2</sup> האמצעית יפול ספק חזק. [ק 283] [2] וזה שאורך זמן הסבוב האחד מהשמש מצאו בטלמיוס ברפ"ה שנה שבינו ובין אברכס ומצאו גם כן אברכס ברפ"ו שנה שבינו ובין מבט קדום פחו' משס"ה יום ורביע יום חלק מש' חלקי' ביום האחד ר"ל שהם מצאו זה החסרון יום אחד בשלש מאות שנה. [3] ובא אלבתאני אחריו בכמו<sup>3</sup> תש"כ שנה ומצא אורך זמן הסבוב האחד מהשמש פחות ממה שזכר בטלמיוס באופן שיהיה החסרון בג' מאות שנה ב' ימים כ' שעות בקירוב ויהיה החסרון יום אחד בק"ו שנה בקירוב. [4] ואחר זה בכמו ת"פ שנה מצאנו אנחנו מהלך השמש יותר מאוחר ממה שמצאו אלבתאני מ"ח דקי' וכ"ה שניים בקירוב, כשהונח תקון השמש לפי שיעור היציאה בו מהמרכז כמו שיראה מהקדירות הירחיים והשמיים שעמדנו עליהם במבט לפי מה שיתבאר בג"ה במה שיבא. [5] ולזה יהיה החסרון בת"פ [פ 108 א] שנה ג' ימים וי"ז שעות וי"א דקי'. [6] ויהיה החסרון יום אחד בקכ"ט שנה וס"ג יום בקירוב וזה מסכים בקירוב למה שמצאו המדקדקים בזה החשבון יותר ממאתים [נ 222 א] שנה אחר זמן אלבתאני כי הם מצאו זה החסרון חלק מקל"א ביום כמו שיראה מדברי החכם ר' אברהם אבן עזרא בספר המולדות, ובזה האופן מצאה אלצופי ואברהים אלזרקאל אחריו לפי מה שזכר שם. [7] וזה ממה שיפול ספק חזק בזאת החקירה.

[8] וגם כן הנה בענין נטיית קטבי אופן המזלות מקטבי אופן המישור מן הספק והמבוכה מה שלא יעלם. [9] וזה שבטלמיוס והקודמים מצאו נטיית גלגל השמש מגלגל משוה היום בהיותו בראש סרטן ובראש גדי כ"ג מעלות ונ"א דקי' לפי מה שספרו מזה. [10] ואחר מצא אלבתאני שיעור זאת הנטיה<sup>4</sup> כ"ג מעלו' ול"ה<sup>5</sup> דקי', וכן מצאוהו כל הבאים אחריו

- 1 פנ: בשווי שיעור; ק: בשעור שווי.  
2 פנ: שמש; ק (חסר).  
3 קנ: בכמו; פ: כמו.  
4 פנ: הנטיה; ק (חסר).  
5 קנ: ל"ה; פ: ל"א.

[37] וזה רחוק שיצוייר כי אין בירח תנועה לא תשלם בזמן קצר לפי מה שיראה מענייניו. [38] ואם היתה לו זאת התנועה היתה לו תנועה מתאחרת לא יראה [נ 224א] בה רושם {לא בהנעת הגובה}<sup>17</sup> ולא בהנעת ראש התנין. [39] וזה בלתי ראוי שיונח כן כי אין בכאן דבר יכריחנו להכניס כמו זאת התנועה בירח,<sup>18</sup> ואין ראוי שנישים רבוי הכלים אם לא יביאנו לזה מה שיתחייב ממנו זה בהכרח. [40] וזה כלו ראייה על שכבר נכנס טעות באלו המבטים. [41] ולא אשער גם כן איך אפשי' שיונח השמש מאוחר התנועה זמן ארוך אחר שב מהיר התנועה. [42] והוא מבואר שזה לא יתכן בגרם השמימי אלא שיהיה החלוף בחלקי הסבוב האחד מן התנועה לפי מקומותיה מהסבוב לאחת מהסבות שזכרנו לפי שאין בתנועת השמש תנועה יקיף הסבוב האחד ממנה ביותר מזה הזמן אשר זכרנו זולתי תנועת הגובה. [43] הנה אם היה הענין כן יחויב שיהיה זה מצד תנועה הגובה שהיא<sup>19</sup> בלתי נשלמת כי אם בזמן ארוך מאד לפי מה שיראה מענינה. [44] וזה אמנם יצוייר כשתונח זאת התנועה יותר מתונית בזמן אברכס ובטלמיס ממה שהיתה בזמן אלבתאני ובזמננו. [45] ואם היה זה כן הנה היה<sup>20</sup> ראוי שימצא זה החלוף בעינו<sup>21</sup> במהלך הגובה, ואנחנו לא מצאנו הדבר כן. [46] וזה כי אלבתאני מצא מהתוספת במהלך הגובה על מה [פ 109א] שהניח בטלמיס מזה יותר ממה שמצא מהתוספת במהלך השמש כמו ה' מעלו' וחצי, ואע"פ שניח שהסכים בטלמיס שיהיה הגובה מתנועה בשיעור תנועת הכוכבים הקיימים שהיא מעלה אחת בכל<sup>22</sup> מאה שנה לדעת [נ 224ב] בטלמיס. [47] וכן מצאנו אנחנו מתוספת בתנועת הגובה מזמן אלבתאני עד זמננו<sup>23</sup> מעלה אחת בכל מאה<sup>24</sup> שנה כמו ו' מעלו' וי"ב דקי', ולא מצאנו מהתוספת על תנועת השמש לפי מה שיניחה בטלמיס כי אם ב' מעלו' וה' דקי' וח' שניים. [48] ועוד שאם היתה זאת התנועה מתחלפת בשמש על זה האופן {הנה מפני שמרחק [ק 84ב] הירח מהשמש בתנועתה האמצעית נמצא תמיד על<sup>25</sup> האופן שהניח בטלמיס

- 17 פק: לא בהנעת הגובה; נ (חסר).  
 18 פק: בירח; נ: בהכרח.  
 19 פק: שהיא; נ: שהיא כל.  
 20 קנ: הנה היה; פ: הנה.  
 21 פק: בעינו; נ: בענינו.  
 22 פנ: בכל; ק (חסר).  
 23 פנ: זה; ק: זה על.  
 24 פנ: בכל מאה; ק: במאה.  
 25 פק: והנה מפני ... תמיד על; נ (חסר).

הקדום בגלגל הוא יותר קרוב אל הארץ במרחק הרחוק והקרוב ממנו ואחר כן צמח הגלגל ההוא בכל חלקיו באופן שיהיה יותר גדול וישים השמש תמיד יותר רחוק מראותנו ממה שהיה בזמן הקדום, או אם כדור גרם השמש היה אז יותר גדול ואחר זה נתן ושב [ק 84א] יותר קטן. [25] כי זהו מהגדול שבשקרים שאפשי' שיצויירו בזה לפי מה שהתבאר בטבעיות מטבע זה הגרם השמימי.

[26] וכן הוא מבואר שלא יתכן שיאמר שהסבה כשהיה אז המרחק הרחוק מגלגל השמש יותר קרוב אל [פ 108ב] הארץ ממה שהוא עתה כשיונח מרכז גלגל השמש מתנועה בעגולה קטנה תקריבהו פעם אל הארץ ותרחיקהו פעם, ויהיה בזמננו זה מרכז גלגל השמש יותר רחוק מן הארץ ממה שהיה בזמן בטלמיס. [27] וזה שאם היה זה כן היה מחויב שיהיה המרחק השפל יותר קרוב ממנו הרבה ממה שהיה המרחק הרחוק בעת מבט בטלמיס. [28] ולזה היה מחויב שיראה לנו גודל<sup>14</sup> קוטר השמש בהיותו בשפל הגלגל יותר גדול ממה שמצא בטלמיס שיעורו בהיותו במרחק הרחוק, וזה הפך מה שנמצא במבט. [29] כי אנחנו לא מצאנו שיעור גודל<sup>15</sup> קוטר השמש בהיותו במרחק השפל כי אם ל' דקי'. [30] ולזה יראה שמה שבאר מזה בטלמיס לא הגיע ממבטים אמתיים. [31] וכבר יתבאר מה שהתחייב ממנו זה אצל המאמר בתכונת הירח. [32] ובכלל הנה היתה הסבה בזה [נ 223ב] הטעות כמו שיתבאר שם היותו מניח נטיית הירח בתכליתה ה' מעלו' והיא אינה כי אם ד' מעלו' וחצי כמו שנבאר שם ממבטינו המדוקדקים בתכלית מה שאפשי' מן הדקדוק. [33] וכן מה שזכר משיעור יציאת המרכז לגלגל השמש הוא מבואר מזה שהוא בלתי אפשי', וזה שאי אפשי' היותו אז על האופן שזכר בטלמיס ואחר כן תתקרב המרכז ההוא אל מרכז הארץ ושב המרחק באופן שזכרנו.

[34] וכן לא יתכן שתהיה בזמן הקדום נטית גלגל השמש ממשוה<sup>16</sup> היום יותר ממה שהיא עתה אלא אם יתנועעו קטביו בעגולה קטנה. [35] ואם הונח הענין כן לא יתכן שיהיה נמצא כל זה הזמן הארוך בזאת הנטייה המעטה ובכל הזמן הקודם עד בטלמיס בנטייה ההיא שזכר שהיא מוסכמת מהקודמים, אבל תהיה פעם הולכת אל התוספת ופעם אל החסרון. [36] ועוד שאם היה הדבר כן היה מחויב שתונח כמו זאת התנועה לקטבי גלגל הירח באופן שישומו תמיד הירח נוטה מהעגולה שירשמה השמש בגלגל המזלות בשיעור אחד מהנטייה כדי שימשך מזה ענין הלקויות השמשיים והירחיים באופן אחד תמיד כמו שיראה מענינם.

- 14 ק: גודל; פנ: גדול.  
 15 פק: גודל; נ: גדול.  
 16 פק: ממשוה; נ: משוה.

מההפוכים או באחד מהשוויים. [61] הנה אין לנו לבטוח על כל פנים שיהיו אותם המבטים צודקים. [62] וזה יתבאר ממה שאומר, והוא שכבר תמצא באותם המבטים שזכר בטלמיוס מה שיחייב שיכנס טעות<sup>34</sup> רב במבטים ההם כמו [פ 109ב] שיראה מדבריו שם בביאור. [63] ולזה ידמה שאמ' בטלמיוס כי אין ראוי שישתדל האדם שיסכים חשבונו לכל המבטים. [64] וזה מבואר שאם היו אותם<sup>35</sup> המבטים צודקים היה מחויב בחשבון הצודק אשר בענין תנועת השמש שיסכים לכל המבטים ההם, כי האמת הוא ראוי שלא ימצא החוש חולק עליו בעת מהעתים.

[65] ואחשוב שכבר נכנס טעות באלו המבטים שהשתמשו בהם הקודמים בידיעת זמן השוויים וההפוכים לסבות רבות.<sup>36</sup> [66] אמנם בהפוכים הדבר מבואר כי בכלי האצטורלאב לא יתכן לעמוד בזה למיעוט הנטיה שם. [67] ואמנם בשוויים כי לא יתכן לעמוד על זה מפני גובה השמש<sup>37</sup> אם לא נודע תחלה גובה הקוטב במקום ההוא. [68] ולא יתכן שידע גובה הקוטב מפני ידיעת גובה השמש באחד מההפוכים אם לא נודע תחלה שיעור הנטיה אשר לגלגל המזלות מאופן המישור. [69] והנה הקודמים לא עמדו על השיעור<sup>38</sup> ההוא כמו שהתבאר ממה שהסכימו עליו מזה, כי הם שמו הנטיה כמו י"ו<sup>39</sup> דקי' יותר גדולה מהשיעור שהוא עליו.

[70] ועוד כי יתכן שיהיה טעות בכלי במעשהו כמו שבארנו בראש זה המאמר, והוא יוביל [נ 226א] לטעות גדול בזה. [71] ואמנם טבעת<sup>40</sup> הנחשת הקבועה באלכסנדריא אשר בה היו הרבה מאלו המבטים לא נבטח שלא יהיה בעשייתה טעות. [72] וזה שהיא על שטח עגולת משווה היום, והנה הקודמים כמו [ק 85א] שזכרנו לא עמדו על שיעור הנטיה הנמצאת לשמש שהיא התחלה לעמוד על גובה הקוטב במקום {והוא התחלה לידיעת

31	קנ: התחלת; פ: בתחלת.
32	קנ: מאחד; פ: באחד.
33	פק: הקדומים; נ: הקודמים.
34	קנ: טעות; פ: שיעור.
35	קנ: אותם; פ: אלו.
36	קנ: לסבות רבות; פ: לסבות.
37	קנ: השמש; פ: השמש אז.
38	ק: השיעור; פנ: שיעור.
39	קנ: י"ו; פ: י"ז.
40	פק: טבעת; נ: טבע.

עד שאלבתאני לא הוצרך לתקן בחשבוננו דבר בזה הזמן הארוך אשר בין בטלמיוס ובינו. [49] וגם אנחנו מצאנוהו צודק במבטינו בקרוב. [50] הנה יחויב אם היה זה החלוף בתנועת השמש האמצעית שיהיה שם כמו זה החלוף בתנועת הירח ויחויב אם כן שתנוח בירח תנועה מתאחרת מתחלפת על האופן שהונחה בשמש. [51] וזה דבר בלתי ראוי שיונח כן כי לא נראה בירח תנועה תביאנו להניח בו תנועה מתאחרת, וזה יתבאר בביאור יותר שלם אצל המאמר בירח.

[52] ועוד שכבר יתבאר במה שיבא בג"ה אצל המאמר בתנועת<sup>26</sup> הכוכבים הקיימים שכבר מצא אלבתאני תנועתם על קטבי אופן המזלות מעלה אחת בס"ו שנה מצרית בכמו תש"כ שנה שהיה בין מבט בטלמיוס ובין מבטו. [53] ובזה מצאנוהו אנחנו בקרוב בכמו ת"פ שנה שהיה בין מבט אלבתאני ובין מבטינו לא יחסר מזה אלא מה שאפש' שיוחס אל הקרוב אשר במבט. [54] וזה ממה שיוורה במה [נ 225א] שאין ספק בו שתנועת הכוכבים הקיימים היא שוה, ר"ל שהיא תמיד באופן אחד.

[55] ואנחנו כאשר הבטנו בירח לפי המבטים הקדומים<sup>27</sup> בעת הסתירו כוכב מהכוכבים הקיימים וחשבנו מקום הכוכב הקיים אז לפי מה שיתחייב משיעור התנועה שמצאנו להם. [56] הנה נעמוד מזה בזולת קושי גדול על מקום הירח האמצעי בעת זה המבט אחר שנדע התקון הראוי אז לירח מצד תנועת החלוף ומצד שיעור התחלפות ההבטה, כי שיעור הזמן שתשלם בו תנועת החלוף בירח כבר נודע עד שלא נמצא בו מהטעות<sup>28</sup> דבר מורגש בזה הזמן הארוך אשר בינינו ובין הקודמים שעמדו על שיעור זאת התנועה. [57] וכאשר נעמוד על שיעור מרחק הירח מהשמש בעת זה המבט מצד החשבון שהסכימו בו בטלמיוס והקודמים אשר נמצא צודק עד היום, הנה נעמוד מזה על<sup>29</sup> מקום הירח האמצעי בעת זה המבט. [58] אלא שזה ממה שלא נוכל לעמוד עליו בזה המקום קודם שנשלים המאמר בשיעור תקון תנועת החלוף ובשיעור התחלפות ההבטה. [59] ולזה יחויב שנמתיין<sup>30</sup> המאמר בזה עד שישלים לנו המאמר באלו התקונים אצל המאמר בתכונת הירח.

[60] ואולם בזה המקום לא נוכל לעמוד על שיעור תנועת השמש כי אם נשים התחלת<sup>31</sup> עיונונו בזה מאחד<sup>32</sup> מהמבטים הקדומים<sup>33</sup> אשר נראה בו השמש באחד [נ 225ב]

26	פ: בתנועת; קנ: בתכונת.
27	ק: הקדומים; פנ: הקודמים.
28	פק: בו הטעות; נ: בזמן הטעות.
29	פנ: על; ק: עד.
30	קנ: שנמתיין; פ: שאמתיין.

באופן בעיניו שהיה בו מבטינו<sup>51</sup> מהדקדוק, כי אז יודע במה<sup>52</sup> שאין ספק בו שיעור החסרון משס"ה יום ורביע. [84] ועם כל זה הנה אפש' שנבאר בזה המקום מהמבטים הקדומים<sup>53</sup> עם [פ 110א] הקירוב הנמצא בהם שמה שנתברר לנו מסכים למבטים ההם בקירוב. [85] וזה שכבר יראה מהמבט שהביא אברכס בדקדוק השווי האביבי מהקדרות שהיה במ"ג שנה מהסבוב השלישי משנות פיליפוס שהיה בכ"ט יום מחדש מאסורי בלילה אשר שחרה יום ל' בחצי הלילה והיתה זאת השנה קפ"ט שנה אחר מות אלסכנדר. [86] ומאחר זה רע"ד שנה מצא בטלמיוס לפי מה שספר החסרון משס"ה יום ורביע כ"ג שעו' ואלבתאני מצא זה החסרון לפי מה שיראה מחשבונו בתש"כ שנה ו' ימים י"ט שעו' כ' דקי'. [87] וכאשר קבצנו זה כולו היה מה שיחובר מהחסרון בתתקצ"ד שנה ז' ימים י"ח שעו' [נ 227א] כ' דקי' ויעלה יום אחד לקכ"ח שנה וזה מסכים בקירוב למה שמצאנו מעת בטלמיוס עד עת מבטינו, וזה אם הנחנו שיהיה מבט אלבתאני בזה צודק.

[88] ובכלל הנה<sup>54</sup> אין דרך לבאר זה באופן שלם אם לא ממבטי הירח הקדומים<sup>55</sup> כמו שזכרנו כי הם יעמידונו על מה שהיה מהקירוב במבט בטלמיוס ואלבתאני. [89] ועם כל זה הנה זה המבט יישירנו באופן מה אל שתנועת השמש המיוחדת ותנועת הגובה הולכות<sup>56</sup> אז ועתה על אופן אחד. [סוף הפרק הנ"ח]

גובה אופן משהו היום במקום<sup>41</sup> מקום והוא מבואר. [73] עוד שאע"פ שנודה שכבר הונחה בגובה הראוי לפי גובה אופן משהו היום באלכסנדריא הנה כבר יתכן שיכנס בזה<sup>42</sup> טעות מצד מצבה בצדדי מזרח ומערב, ר"ל שאם לא היה שטחה מונח על יושר הקו הישר המגיע מזריחת ראש טלה או ראש מאזנים אל שקיעתו הנה יקרה מזה המבט טעות, ר"ל שכבר יקרה שיהיה השמש קודם נקודת השווי או אחריה בהיות האור נפרש על שני שטחי הטבעת. [74] וזה ממה שלא יעלם מהמעייין בזה הספר.

[75] ועוד כי זה המבט מפני שלא יהיה כי אם ברגע אחד, והיה אפש' שיקרה ברגע<sup>43</sup> ההוא שיהיו עננים או אדים בין ניצוץ השמש ובינינו יעתיקו ניצוצו על זולת מקומו, הנה יקרה מזה שיהיה במבטו טעות. [76] ואולם באופן שהשתמשנו אנחנו באלו המבטים לא יתכן שיקרה זה, כי כבר יכפל בזה המבט פעמים רבות אצל ההפוך האחד או השווי. [77] ונבחן בזה האופן המבט הצודק מהבלתי צודק. [78] ולאילו הסבות או לקצתם תמצא במבטים שזכר בטלמיוס מה שלא [נ 226ב] יתכן שיסכים לאמת.

[79] וכבר יתבאר לך הטעות שנכנס במבטי הקודמים<sup>44</sup> ממה שאמ' בטלמיוס, וזה שהוא אמר שאין כח באדם לדעת רגע הכנס השמש בראש מזל<sup>45</sup> טלה. [80] ולא ידעוהו הקודמים ולא ידעוהו המתאחרים. [81] ואם לא היה לו<sup>46</sup> כח {לדעת רגע לו<sup>47</sup> הכנס השמש בנקדת השוים באלו הכלים אשר היה מביט בהם שלא היה לו כח לדעת<sup>48</sup> רגע הכנס השמש בנקודת ההפוכים. [82] ובהיות הענין כן הנה<sup>49</sup> הוא מבואר מדבריו שכבר נכנס באלו המבטים טעות, והנה לא יוכל לברר המבט הבלתי צודק מהצודק.

[83] ואולם יהיה מבטינו<sup>50</sup> התחלה למצוא האמת בזה כשיובט בו אחר זמננו זמן ארוך

- 41 פ: והוא ... במקום; ק: מקום והיא ... במקום; נ (חסר).  
 42 קנ: בזה; פ: בה.  
 43 פק: ברגע; נ: בו ברגע.  
 44 פנ: הקודמים; ק (חסר).  
 45 פ: מזל; קנ (חסר).  
 46 פק: לו; נ (חסר).  
 47 נ: לו; ק (חסר).  
 48 קנ: לדעת ... לדעת; פ (כתוב בשולים וקשה לקרוא).  
 49 ק: הנה; פנ (חסר).  
 50 פק: מבטינו; נ: מבטים.

- 51 ק: מבטינו; פ: מבטיו; נ: מבטים.  
 52 פק: במה; נ: ובמה.  
 53 פק: הקדומים; נ: הקודמים.  
 54 קנ: ובכלל הנה; פ: ובכלל.  
 55 הקדומים; פקנ: הקודמים.  
 56 פ: הולכות; קנ: הולכת.



## Acknowledgments

I am most grateful to José Chabás, Giora Hon, Gad Freudenthal, Ruth Glasner, and Tzvi Langermann for their comments on earlier drafts of this paper. In a private communication Shlomo Sela provided valuable information about Abraham Ibn Ezra. Sarah Klein-Braslavy kindly sent me a draft of her paper, “Gersonides’ Use of Aristotle’s *Meteorology* in his Accounts of some Biblical Miracles,” in this volume, pp.241-313, and generously offered advice on Levi’s use of the Hebrew term *’ed*. Menachem Kellner helpfully sent me a list of occurrences of *’ed* and *’edim* in Levi’s biblical commentaries, and Eyal Meiron graciously gave me a copy in electronic form of his unpublished critical edition of Levi’s supercommentary on Averroes’s commentary on Aristotle’s *Meteorology*.