

## 开普勒拯救火星大“灾变”

在每隔 32 年的某几个星期内,无论是托勒密的地心体系还是哥白尼的日心体系所预测的火星位置都与观测值有大约  $5^\circ$  的偏差,这个偏差就是第谷(Tycho Brahe)1593 年所发现的火星大灾变。

在 2011 年 9 月出版的 *Physics Today* 杂志上,刊登了哈佛—史密松天体物理中心天文和科学史退休教授 Owen Gingerich 撰写的《火星大灾变和开普勒如何拯救它》一文。文中详细介绍了火星大灾变的起源和开普勒拯救这一灾变的具体过程,以及这一过程对整个天体物理学的启示。

1582 年底,第谷偶然想到一个奇妙的方法来验证传统的托勒密地心说和当时刚刚出现的哥白尼日心说。这两个学说预测的行星位置基本相同。托勒密的地心说认为,火星始终在太阳范围以外的空间运行,因此它到地球的最短距离至少是一个天文单位(AU)。哥白尼的日心说则认为,火星是离地球最近的行星,它到地球的最近距离只有半个天文单位(见图 1)。如果能够设计一个实验来测量火星到地球的最近距离,就可以验证哪一个体系与事实相符。

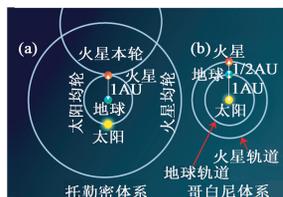


图 1 (a)在托勒密体系中,一颗行星在较小的本轮上做匀速圆周运动,而这个轨道中心又在庞大的均轮上做匀速圆周运动。火星的本轮只有它均轮的  $2/3$ 。当火星运行到太阳的正对面时,火星到地球的距离是最近的,为一个天文单位;(b)在哥白尼体系中,地球轨道只有火星轨道的  $2/3$ 。在忽略了火星轨道偏心量的情况下,二者的最小距离只有半个天文单位

为此,他提议使用一项当时人们所熟悉的周日视差技术<sup>1)</sup>。当火星运行到太阳的正对面,即火星离地球最近时,开始测量火星与地球之间的距离。分别在太阳刚落山时和即将升起时,观测火星东升和西落的位置。如果在赤道上进行这个测量,则地球的自转提供了一条长度等于地球直径的三角测量基线。当在赤道以北进行这个测量时,这条基线会短一些,但对于火星来说已经足够长。当时人们所认为的日地距离比正确值小了 20 倍。如果这个日地距离值是正确的话,第谷的精确观测本应该能让他得到答案。

## 第谷制作折射表发现火星大灾变

1585 年 1 月,第谷再次进行了尝试,却得到了一个负视差,这意味着火星离地球比无穷远还远。这显然是荒谬的。第谷很快就意识到了问题的症结所在,即我们现在所说的较差折射。通常情况下我们所观测的对象是在高空中的,但是周日视差法却要求当火星接近地平线时对其进行观测,这时的大气折射会让一颗行星或恒星稍微高于地平线。由于观测时所采用的比较星和火星不在同一地平高度,所以必须修正比较星的视位置。

于是第谷开始建立折射表。在给定的地平高度下,为了测定大气折射,需要知道真实的没有被大气折射过的高度,即直射高度。第谷分别利用太阳和星星来推测直射高度,制作了 2 张折射表。通过太阳制作的折射表由于使用了当时被广泛接受但不正确的日地距离,使得太阳偏心圆轨道的偏心率有些问题,从而不可避免地造成了这一折射表的缺陷。而在利用星星时,第谷使用了赤道经纬仪。通过测量星星在不同地平高度上的视赤纬<sup>2)</sup>,第谷推导出了另一张折射表。

1587 年 3 月,当火星再次运行到太阳正对面时,第谷进行了第三次观测。如果采用通过太阳制作的折射表,并忽略误差,他得到了一个与哥白尼日心说相符合的视差。当时,第谷并没有意识到他所得到的视差是由于太阳折射表的错误产生的。第谷立刻写信给几位记者,声明他已经成功地确定了火星是离地球相当近的。

具有讽刺意味的是,第谷并没有接受哥白尼日心说,而是采用地心学说,即所谓的第谷体系:地球位于宇宙中心,静止不动;行星绕着太阳转,而太阳则率领行星绕着地球转。在第谷体系和哥白尼体系中,火星到地球的最短距离要比托勒密体系中近 2 倍。作为一个伟大的科学家,第谷不可能不对其所选择的折射表进行检验。通过赤道经纬仪,第谷又为木星推导出了一张新的折射表,从而发现了自己的错误并陷入沉思。

1593 年 8 月,第谷又对火星进行了观测。他以表格的形式将结果记录在工作日志上。这些结果给他带来了灾难性的打击。这颗红色的星球(火星)不管用托勒密体系还是用哥白尼体系计算,都不在预测的位置上。哥白尼体系和托勒密体系所预测的火星位置(赤经)分别比第谷的观测值差了一  $4^\circ$  和  $+5^\circ$ ,而且这个偏差持续了好几个星期。

## 开普勒的到来

1600 年 11 月,第谷及其家人来到布拉格。大约 1 年后,他招了一名新的助手,那就是开普勒(Johannes Kepler),一位自认为被大材小用的格拉茨路德教会神学院的老师。在被第谷录用后,开普勒被分配去解决一些火星难题。第谷有没

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权,与 *Physics Today* 合作的项目

- 1) 视差:从有一定距离的两个点上观察同一个目标所产生的方向差异。从目标看两个点之间的夹角,叫做这两个点的视差,两点之间的距离称作基线。只要知道视差角度和基线长度,就可以计算出目标和观测者之间的距离。——译者注
- 2) 在天球赤道坐标系中,天体的位置用经纬度来表示,称作赤经、赤纬。赤经与地理坐标中的经度类似,赤纬与地理坐标中的纬度类似。赤纬是天体的位置与天赤道位置的角度差。如果没有大气折射,一颗星星在不同地平高度的赤纬应该是恒定的。——译者注

有告诉开普勒 1593 年发现的火星大灾变我们不得而知,但开普勒肯定可以在第谷的工作日志里找到相关内容。

开普勒很快就发现,火星大灾变问题的症结不在于火星,而在于人们假定的地球运行轨道。在哥白尼体系中,行星围绕太阳运行的轨道并不是以太阳为中心的圆轨道,而是偏心圆(即圆轨道的中心偏离太阳)。因此,行星距离太阳越近,运动速度越快。地球则是唯一的例外,它虽然也是一个偏心圆轨道,运行速度却是一个常数。地球以恒定的速度在其轨道上运行这一假设是哥白尼将托勒密地心说转换成日心说时的人为产物。哥白尼体系中地球的轨道运行相当于托勒密地心说中的本轮。为了简便起见,托勒密假设天体在本轮上是做匀速圆周运动的。因此,哥白尼很自然地就把地球的轨道运动看成是一个匀速圆周运动。

### 物理和几何

在开普勒时期,几乎所有的天文学家都渴望通过几何学来寻找灵感。但是开普勒却企图通过物理学知识来解释天体运动。他认为,哥白尼体系中地球的恒定速度是没有任何物理意义的。地球实际上应该在一月份离太阳更近的时候运动得更快。在托勒密体系和哥白尼体系中,由于太阳或地球的圆轨道是偏心的,太阳在一月份的时候看起来运动得更快,开普勒称这一现象为视效应。他认为观测到的天体运动应该是由视效应和物理学效应结合起来的视运动。根据开普勒的推测,如果这两种效应的作用相当,哥白尼体系中的地球圆轨道的偏心量应该减半。

开普勒自己设计了一台仪器,通过测量太阳在整个季节当中的视直径来推算 1 月和 7 月日地距离的微小差别。但是结果却没有他想象的那样令人信服。半个世纪以后,天文学家卡西尼(Giovanni Domenico Cassini)在意大利博洛尼亚大教堂通过子午投影,令人信服地证实了这个微小差别,也因此为自己赢得了辉煌的声誉。

同时,开普勒开始了火星距离的精确测量。图 2 摘自其 1609 年出版《新天文学》(Astronomia nova)一书,这张著名的图展示了开普勒独特的三角测量方法。火星的轨道周期是 687 天,当火星公转一周回到轨道上某一给定位置时,地球距其公转两周还差 43 天,因而天文观测者实际上是从两个不同地点观测了该位置的火星。通过从第谷工作日志上收集到的相隔 687 天的观测数据,开普勒用他的三角测量方法精确给出了地球的运动轨迹(即地球轨道)。正如他猜想的那样,哥白尼体系中地球轨道的偏心量是需要减半的。

不知道开普勒当时是否意识到,地球轨道偏心量减半其实已经解决了火星大灾变问题。之后,开普勒开始研究一个更细微的问题。在跟踪火星在日心参考系中的位置时,他发现,如果采用圆形火星轨道,那么将会在轨道八分位(45°处)的地方引起 8' 的偏差(在火星离地球最近时,这个日心参考系中的 8' 偏差在地心参考系中将达到 0.5°)。而第谷的观测数据误差只有 2' 或者更小。开普勒不敢懈怠,经过艰苦努力,他最终发现火星轨道是椭圆的,从而把偏差减小了一个量级。

事实上,开普勒尝试过使用各种各样的椭圆曲线去拟合

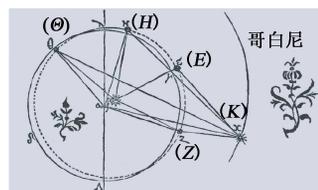


图 2 用于测定地球轨道的开普勒三角测量图(摘自开普勒 1609 年出版的《新天文学》一书)。在哥白尼体系中,火星每 687 天都会回到它轨道上一个相同的点 K。地球由 O 点开始,进行为期 365 天的逆时针公转,再过 322 天,它到达 H 点,在这总共 687 天中,火星则完成了它的公转。类似地,在火星后续的公转中,地球会移动到 E 点和 Z 点。通过相隔 687 天的一系列测量值,开普勒证实了地球的运动轨迹(地球轨道)是图中所示的虚线而不是实线(即偏心量减半)

观测结果。由于找不到合适的物理解释,他一直不满意拟合的结果,直到他注意到了一条焦点正好在太阳位置的椭圆曲线。这条曲线和焦点使得开普勒更容易通过物理学来解释观测事实。对于开普勒来说,对观测事实的解释要令人满意,物理模型是至关重要的。他为《新天文学》一书加上了一个副标题:基于物理原因。由于他和第谷继承人之间的矛盾,该书 4 年后才得以出版。

### 1625 年 8 月,奥地利林茨

第谷记录火星大灾变 32 年后,即 1625 年的 8 月,人们重复了第谷当年的观测<sup>3)</sup>。此时,托勒密地心说和哥白尼日心说所预测的火星位置再次显示出了巨大差异。此时火星位于近日点(离太阳最近的地方),在地球上进行观测时,得到的赤经偏差和轨道椭率无关。32 年前出现的火星位置偏差(赤经偏差)完全是由于地球轨道定位错误,即圆轨道的偏心量错了。当时,开普勒正在奥地利的林茨撰写《鲁道夫星表》(Rudolphine Tables, 1627 年出版),书中重新给出了地球的运行轨道,并预测了所有行星的位置。以前所预测的火星位置的偏差也被修正了。开普勒此时知道他已经完全解决了火星大灾变问题。

开普勒的修正使得预测的火星位置的最大偏差减少了大约一个量级,从 5° 减小到了 0.5°。而这个 0.5° 的偏差,没有出现在火星近日点,而是出现在火星离地球最近且火星处于轨道八分位上时。后来,开普勒把火星<sup>4)</sup>放置于某一椭圆轨道上后,最大偏差又减少了一个量级,从 30' (即 0.5°) 减小到了 2'。

开普勒于 1630 年去世,也就是在伽利略出版预示着惯性定律的《关于两门新科学的谈话和数学证明》(Discourses and Mathematical Demonstrations Relating to Two New Sciences, 1638 年出版)一书之前。在没有惯性概念的时候,开普勒所认知的物理是存在严重缺陷的。不管怎么样,他对物理学重要性的直觉是非常重要的。牛顿(Isaac Newton)在 1686 年给哈雷(Edmond Halley)的一封信中写道:“开普勒知道,轨道不是圆

3) 地球公转周期为 365 天,火星公转周期为 687 天,17 个火星年正好等于 32 个地球年,所以第谷的观测(即“火星大灾变”)每隔 32 个地球年就会重现一次。——译者注

4) 原文为“地球”,此系笔误,应为“火星”。——译者注

形的而是卵形的,并猜想轨道是椭圆的。”但是牛顿低估了开普勒.实际上,是开普勒为牛顿铺平了通往基于物理解释的天文学的道路.

(上海大学 韩冀、中国科学院云南天文台 李立芳 编译  
自 Owen Gingerich, *Physics Today*, 2011, (9):50, 原文详见  
<http://ptonline.aip.org>)