

伽利略从黑子移动证明地球的运动

〔美〕 A.M. 史密斯

《关于两个主要宇宙体系的对话》快进行到第三天中间，伽利略决心要从与黑子移动有关的某些表现现象来证明地球的运动。如同他所设想的那样，这个证明所依据的是整个《对话》中以各种方式反复陈述的一般法则：“自然界的一切都是必要的，既不多也不少”。或者（特别适合这里的一种说法）“无论什么，若能用较少的东西来完成，多了就是白费。”换句话说，自然界总是选择最简单的办法来达到既定的效果。这种情况下“最简单”就意味着“用最少的假设”。因此，伽利略的目的是清楚的：证明哥白尼体系在逻辑上优越于它的对立面——托勒玫体系，因为它要求较少的假设；更重要的是，要求较少的运动就能解释所讨论的现象。简言之，伽利略在这些“表现现象”中发现了反对哥白尼假说的决定性的检验证据。

不幸的是，伽利略后来得到的结果远不如他的目的那样明确。不仅他的论证空洞含糊，毫无特色，而且他在解释哥白尼的“第三运动”时（见下面第二节），他的论证变得尤其站不住脚了。伽利略不能掩饰这些缺陷。他抱憾地说：“我知道我所说的，在目前还是相当含糊的”，“但将来是会清楚的，……当我们开始谈论到哥白尼赋予地球的第三运动（一种周年运动）时……”。实际上，这是我们最后一次听到的他有关这件事情的谈论，然而期待的澄清从未出现。

那末自然要问：为什么看起来好像伽利略没有能作好论证而是显得如此情绪低落呢？大多数评论家指出，论证本身有逻辑上

的弱点。他们还说，无论是由于混淆不清，粗心大意或者不诚实，伽利略忽视了这样的事实：在某些特定条件下，实际上哥白尼和托勒玫关于太阳系的解释在逻辑上是等价的。因此他的论证不中用是不足为奇的。然而，S. 德雷克依然认为，这些评论家犯有他们指责于伽利略的同样的过失。他坚持认为，要是他们更仔细看一看，他们或许就会发现，这两种解释只有在我们忽略太阳每天的迴转时才是逻辑上等价的。一旦我们把这种旋转考虑进去，哥白尼的解释在逻辑上的优越性就显示出来了。

德雷克是对的，但他为支持他的结论所给出的论据则不够恰当。一方面，他所提供的“动力学的”理由既使人误解，又不切题。另一方面，他的运动学的解释过于复杂。而且，他在努力证明伽利略的论证正确时，远没有充分地遵循它在逻辑上的各种涵义。要是他做到了这一点，他就会发现，伽利略的论证甚至要比第二眼看到的更加有力。我的目的就是要阐明和扩充德雷克的论证，以便消除任何拖延未决的疑虑，说明尽管伽利略的证明有明显的缺陷，但实际上它却是绝对决定性的。

1. 黑子现象

伽利略在《对话》第三天里所提供的关于黑子运动的解释，参考图 1 容易得到说明。令实线 MN 表示黄道平面，而 EFG, FGH, GHE 和 HEF 表示每隔 3 个月的位置 A, B, C 和 D 上（即在沿黄道的一周年迴转中）黑子

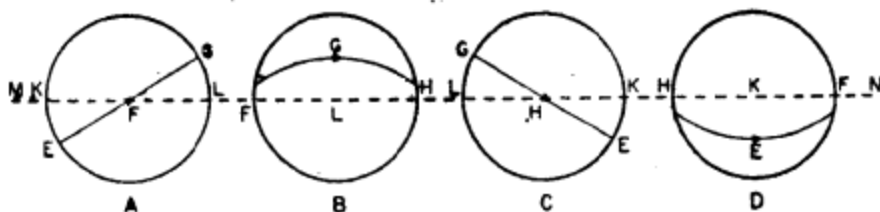


图 1

的投影轨迹。因此，在位置A上看时，黑子看起来是沿直线从E上升到G；在B上看时，它们似乎描绘一条向上的曲线，从F通过G到H；而在C上，它们看起来沿一条直线路径从G下行到E。最后在D上，它们好像沿一条向下的曲线，从H通过E到F。

在确定了这些普遍性观测结果后，伽利略便能够推导出基本的太阳模型，如图2所示。

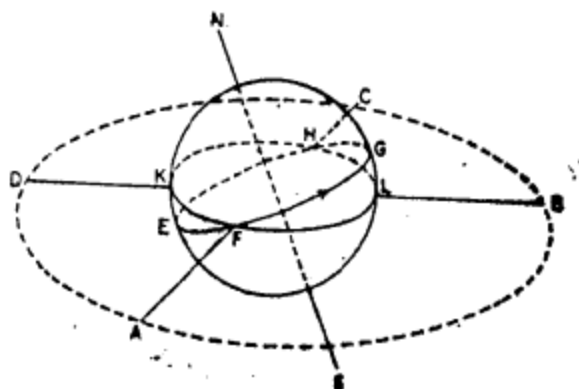


图 2

示，其中DABC(黄道面)和日球截交于大圆KFLH。同时NS是自转轴，太阳大约每个月绕其自转一周。所以EFGH就是太阳的赤道，沿着它的运动方向是逆时针的，从E到G。因此，在一年里任何时刻，黑子运动的视轨迹由黄道上任何一点处所看到的太阳赤道的外观如何而定。例如，从A点上，它看上去是直的，如图1中A所示；而从B点上，它看起来像图1中B所示；以此类推。因此，这些现象的根本原因在于日轴对于黄道的倾斜。但是日轴的这种倾斜引起某些复杂性，对此必须先加以阐明，然后我们才能有效地把哥白尼和托勒玫关于黑子运动的解释加以

比较。为此，我们必须着手对哥白尼的“变轴”模型和伽利略的“固定轴”模型作一简明的考察。

II. 变轴与固定轴

哥白尼没有能够与旧的宇宙论思想方式完全决裂，这一点可以从他在《天体运行论》第1.11节里试图解释地球轴线在整个周年运动的轨道上保持恒定取向中明显看出。他之所以需要有这样一种解释，显然是由于他没有能力摒弃这样一种观念所决定的：所有行星包括地球在内，都以某种方式牢固地嵌在带着它们绕太阳转动的一些水晶球内。然而地球存在一种特殊情形，它的轴线倾斜大约 $23\frac{1}{2}^\circ$ 。因此，如果地球是牢固地安放在一个运载的球内，那末它的轴线的延长线

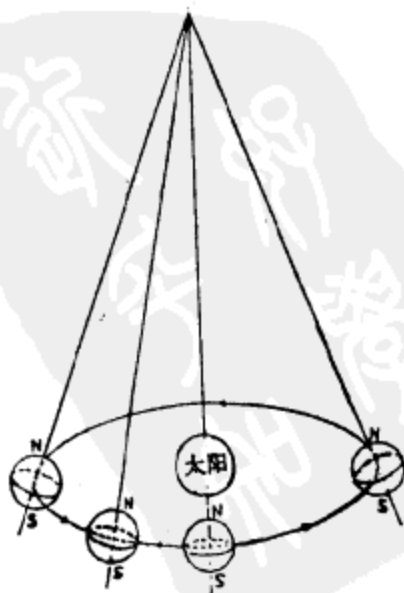


图 3

将在一年期间描绘出一个以X为顶点的直立圆锥，如图3所示。但要是真的是这种情况，那末就没有季节的变化了。在北纬地区将是永无尽止的夏天，而在南纬地区将是永无尽止的冬天。

为了解决这个困难，哥白尼引进地球的“第三运动”。所谓第三是相对于这颗行星绕太阳的周年运动和它的周日自转而言的。他解释说，这种附加的运动使地球轴线作周年的退行摆动。如图4所示，这样一种周年的

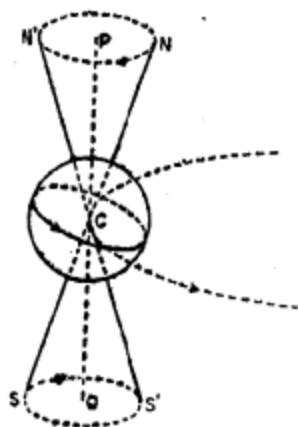


图 4

退行将使轴线NS相对于地球中心(C)作顺时针摆动。在一个半年内，从N摆动到N'；在另一个半年里，又从N'摆回到N。所以轴线NS将形成以C点为顶点的一对直立圆锥，圆锥的轴线PQ垂直于黄道平面。与此同时，地球中心(C)将沿黄道以同样速率逆时针方向绕太阳运动。

最后的效果如图5所示，在地球轨道的F点上(夏至)，NS轴与轨道主圆锥的准线XS相重合。但当地球向前运动到G点上时，NS轴以同样的速率向后退转，取位置N'S'。同样地，当地球前进到H时，这轴线继续退转而取位置N''S''，如此以往沿整个轨道走一圈。这样，轴线本身不断地偏离轨道主圆锥的准线，在半年后的K点上(冬至)达到其最大偏离，在此以后，轴线和准线又开始靠

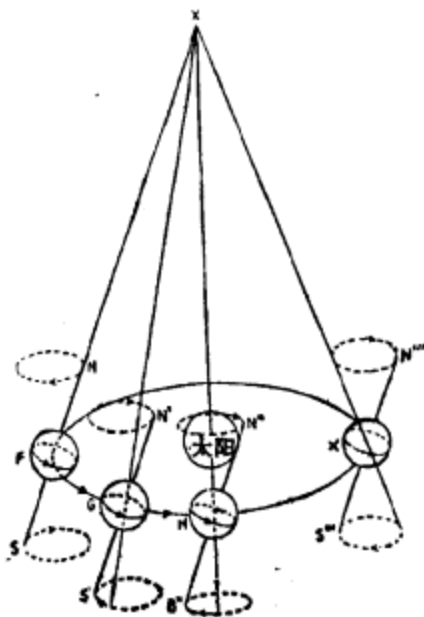


图 5

近，直到夏至时它们再次重合。结果这条轴线保持恒定取向，季节变化成为它们固有的次序。

地球运动的这个模型可以称为变轴模型，因为轴线的相对位置设想在整个周年轨道运动中是变化的。伽利略拒绝了这个模型是因为他推想哥白尼的“第三运动”是多余的。为此，他代之选择了所谓固定轴模型，因为按照这个模型，轴线的稳定性是地球在轨道运动中趋向于保持其原来取向的一种自然作用。这个替代模型的优点当然在于，它避免了为解释整个轨道上轴线保持恒定倾角所需要的一种特殊运动。这种优点适用于哥白尼理论是显而易见的，因为它允许我们把地球的运动减少到两个：周年运动和周日运动。但它也适用于托勒玫理论，假若修改托勒玫理论把太阳自转和日轴的倾斜也考虑进去。因为假定太阳为固定轴模型，我们就可以取消轴线退行的需要，从而把太阳的周年运动限定为它每年绕地球的转动。关于我们比较分析的根据就说到这里，现在我们转入具体分析，从固定轴模型开始。

II. 固定轴：哥白尼解释与托勒玫解释

为了尽可能比较简单，我们可以把下述各点作为给定条件：日轴是倾斜的，太阳大约每月绕该轴逆时针自转一周；黑子的轨道聚集在太阳赤道上；不需要附加其他运动来解释日轴的恒定取向。

哥白尼解释：固定的太阳，运动的地球 如果我们假定地球既作逆时针周年运动，又作逆时针周日运动，那末第一节中所描述的现象几乎是不言自明的。看一看图2就足以表明，当地球运动从A通过B和C到D时，图1中所示的现象将必定出现。而且注意到地球的周日自转实际上对于这些现象毫无影响，因此只需假设一种基本的运动，即黄道平面内绕太阳的逆时针周年运动，就可以说明这些现象。

托勒玫解释：固定的地球，运动的太阳 按照托勒玫体系，地球固定不动，而太阳沿黄道围绕它作逆时针周年运动。由于它的轴线始终保持同样取向，并对黄道平面是倾斜的，所以太阳相对地球所呈现出的季节“面貌”，与哥白尼体系中地球相对于太阳所呈现的面貌是一样的。这样，当它到达黄道上D点时(见图6)，它占据相当于“夏至”的

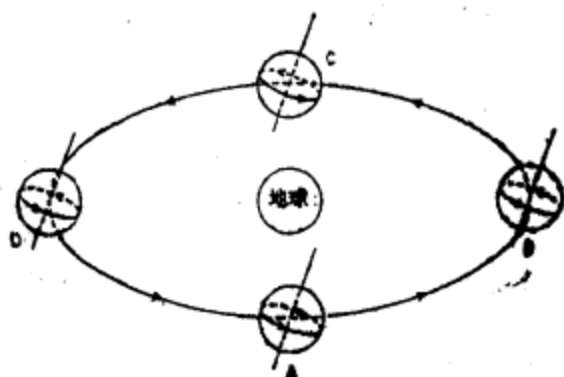


图 6

位置。大约三个月后，到A点，它将处于“秋分点”；而在B点它处于“冬至点”，在C

点它达到“春分点”。这相当于日轴和太阳赤道两者的取向有相对的变化。因此，当从A, B, C和D各点上看来，太阳赤道的外观将如图1中所示。

到此为止，通过假设太阳只有单一周年运动，黑子移动的现象就很自然地得到了说明。但这可能容易使我们产生误解，以为托勒玫和哥白尼的解释在逻辑上是等价的。然而，托勒玫理论还要求太阳每天在一个平行于(或重合于)天赤道的平面内顺时针绕地球旋转，所以它的周日运动和周年运动方向是相反的，并在不同的平面内。

这里的含义可借助图7用图示的办法来

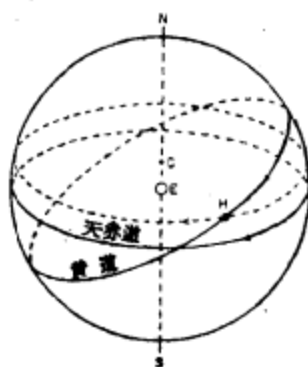


图 7

说清楚。图7表示大的天球，E为地球，位于天赤道中心，H为太阳，位于黄道上。注意黄道和天赤道有两个交点：一个代表春分点，另一个代表秋分点。现在，当H沿黄道绕地球逆时针转动时，黄道本身每天被天球环绕天赤道的顺时针旋转(中心在南北轴NS上)带着转动。因此，在其周日旋转中，H将描绘出一个以地球上方的C点为中心的圆轨道。而且在太阳继续沿黄道运动时，那个中心点C将相应地沿着天轴上下移动，只在春分和秋分时才和地球的中心相重合。于是在大部份时间内，太阳有两个明显不同的运动中心：地球是它周年转动的中心，还有一个在天轴上不断变动的点，是它周日旋转的中心。

因此，太阳的方位在它逆时针周年运动期间发生的任何变化，将在它顺时针周日运动期间或多或少地再现出来，但是次序相反，并且几乎快365倍。换句话说，按照这种固定轴模型，太阳季节面貌的整个变化范围应当在每24小时的时间内以倒行方式表现出来（即图1中从D，通过C和B到A）。

这将使看到的黑子现象发生剧烈变化，

例如，如果我们在日出时观测到一个黑子刚过H点（见图1中的D），那末到日落时看起来它好像已走过整个太阳圆面（见图1中的B）。为了防止这种现象的出现，我们必须强加给日轴一个逆时针的周日退行运动，使得太阳在一整天内大致保持以同一面向着地球。图8可使这一点看得更加清楚。令E表指地球上的观测点，C为太阳中心，NS为日

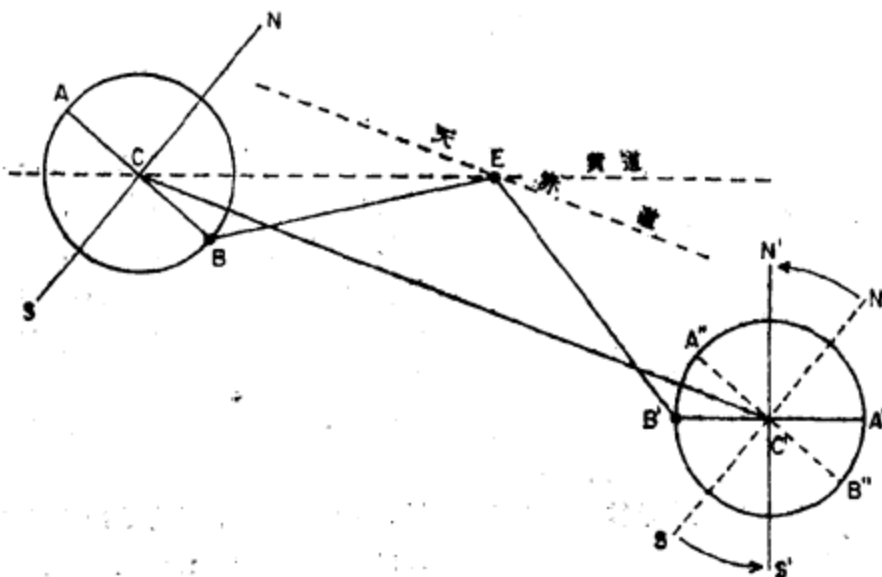


图 8

轴，AB为太阳赤道，B点表示一个黑子，此外，令CE表示黄道平面，CC'表示平行于天赤道的周日旋转的平面。

现在，当太阳在黄道平面内作其逆时针周年转动时，轴线NS是固定的，始终保持平行取向。可是与此同时，太阳又在天赤道平面内或平行于它的一个平面内作每日的顺时针迴转。但如果日轴相对于黄道保持完全固定，那末当太阳迴转了半天从C到C'时（NS保持平行取向），黑子B将在位置B'上，已消失在太阳半球的后面了。所以，我们必须给轴线NS一个周日退行（即逆时针）运动，使得在太阳每日迴转到中途点时，NS取N'S'的位置，太阳赤道AB取A'B'的位置。这样一来，相对于观测点E来说，黑子将在日面上保持固定的位置。此外，如同周年逆

行的情况一样，逆转的轴线将垂直于运动的平面，在此该运动平面也就是天赤道。

因此，除了太阳自己的绕轴自转以外，根据托勒玫假说，我们需要三种运动来解释黑子移动的现象：黄道平面内的逆时针周年转动，天赤道平面内的顺时针周日旋转和日轴绕垂直于天赤道平面的一个轴的逆时针周日退转。

刚才详细地叙述了两种解释，哪一种解释在逻辑上更合理呢？显然，我们应当赞成哥白尼解释，因为它只需要较少的运动——两种运动（其中之一的周日自转与讨论的问题没有关系）就行了，不像托勒玫解释需要三种运动。这两种解释在逻辑上的分歧在很大程度上未引起注意，因为长期以来没有认识到，虽然这两种解释在周年运动方面是同

样成功的，但在周日运动方面，托勒玫解释则难于成立。因此认为两者等价的论断是错误的。但是这种分歧并不是赞成哥白尼解释的唯一理由。除了要求更多的运动以外，托勒玫解释需要把固定轴模型和变轴模型混合起来应用。而且，与跟它对立的哥白尼解释不同，托勒玫解释要求两个相反的运动（顺时针与逆时针）。它还需要两个明显不同的运动中心（地球和在天轴上不断变动位置的一点），以及两个明显不同的运动平面（黄道和天赤道）。这些附加的逻辑上的不一致性，大大地损害了托勒玫的论证。

IV. 变轴：哥白尼解释 与托勒玫解释

同前面一样，我们可以把以下各点作为给定条件：日轴是倾斜的；太阳在大约一个月绕该轴逆时针自转一周；黑子的轨道聚集在太阳赤道上。然而在变轴模型情况下，我们假定日轴的恒定取向是靠逆转（即“第三运动”）来补偿的。

哥白尼解释：固定的太阳，运动的地球 在这种真正的哥白尼学说的情形下，对黑子移动现象的解释与固定轴模型完全一样，除了现在必须再加一个地轴的顺时针周年逆转，使运动数目从2个增加到三个；天赤道平面内的逆时针周日自转，黄道平面内的逆时针周年旋转，和地轴绕垂直于黄道面的一个轴的顺时针周年逆转。

托勒玫解释：固定的地球，运动的太阳 虽然它所提供的解释与上面已经描述过的固定轴模型的托勒玫解释几乎一样，但这种方式的解释要求我们增加一个日轴的顺时针周年逆转运动。因此现在我们不是用三种基本运动，而是需要四种运动：天赤道平面内的顺时针周日旋转，黄道平面内的逆时针周年旋转，日轴绕垂直于天赤道平面的一个轴的逆时针周日退转，和日轴绕垂直于黄道面的一个轴的顺时针周年退转。

毋须再对这样的观点作过多说明了；在两种解释中，哥白尼解释更为可取，因为它相对简单。确实，通过比较可见，托勒玫解释复杂得骇人：它要求两个迥然不同的运动平面，两个迥然不同的运动轴线和两个迥然不同的轨道中心。

V. 结论

我们已经详尽地叙述了哥白尼解释和托勒玫解释的各种可能方式，在固定轴模型和变轴模型的基础上依次对它们作了比较。对于每种情况都证明了哥白尼解释在逻辑上的优越性。但是起决定性作用的比较，应是“最坏情形”的哥白尼解释方式（变轴）和“最佳情形”的托勒玫解释方式（固定轴）之间的比较，因为只有当前者明确地优越于后者时，伽利略论证的正确性才算真正地得到了证明。因为两者都要求三种运动，所以我们显然不能根据运动数目多少来对它们作出选择。然而，系统性的考虑给予“最坏情形”的哥白尼解释以决定性的优势。首先，那种解释只要求一个轨道平面（黄道），而不是两个平面（黄道和天赤道；参照图4和图8）。其次，它只涉及到一个轨道中心（太阳），而不是两个轨道中心（地球和在轴上运动的一个点）。再则，它不需要固定轴模型和变轴模型混用。所以最坏情形的哥白尼解释毫无疑问要比最佳情形的托勒玫解释在逻辑上更为连贯一致。这就是说，伽利略从最佳情形的哥白尼解释（固定轴）作出的证明的确是结论性的。同等重要的是，在哥白尼解释和第谷解释之间进行的类似比较，也决定性地否定了第谷假说，如同前一种比较否定了托勒玫假说一样。简而言之，伽利略把黑子运动作为哥白尼理论的一个决定性的检验证据是正确的，也许比他本人认识到的还更正确。

但是如果这种论证真是关键性的，那末为什么伽利略提出它时显得那样无力呢？也

（下转第5页）

数、三率法、比例和假位法等等概念，因为在该书都有详细讨论、并附有许多例题。这些“商业算术”问题，在中国数学著作中是常见的。

在16世纪的欧洲，发现了用分数数字进行计算的更简易方法，那时在整数的个位右边放置数字来表示这些分数。实际上，这种十进制小数的概念，是刘徽在3世纪使用算筹数字时最早发现的。新的数字及其有关的算术为欧洲代数学的发展提供了原动力。早期阶段包括解一次和二次方程，它们又导致了解不定方程和高阶数字方程。这种发展的类似模式，也可在更早些时候的中文著作中追溯其踪迹。

因此，大量中国古代和中古代的数学著作表明，通过应用算筹，发展和得到了具有三个核心特征内在特性的计数制。

4. 结 论

印度-阿拉伯数字在12世纪通过花拉子米论新算术著作的拉丁文译本传到了欧洲。新的计数制经历了四百年之久，才最终在欧

洲确立了其至高无上的地位。新计数制的传播，受益于日益容易得到的纸张的使用和印刷术的引进。实际上，正是印刷术导致了九个数字形状标准化。新数字引进欧洲是极为适时的——在欧洲中世纪末期与文艺复兴初期。新计数制的范围和潜力的发展，是与新时期学术活动的高涨相符的。新计数制最终奠定了近代数学的基础、导致了该学科的普及。

中国筹算计数制的应用，使得数学在古代和中古代整个时期中得以持续发展。该计数制内在的和实用的特性，可以说明为什么直到17世纪它仍在应用，虽然到那时它的形式已变得过时了。终于中国人也逐渐顺利而毫无改变地采用了西方已采用了的印度-阿拉伯数字。但是他们未曾理解，这个计数制实际上正是他们自己的筹算计数制，只是随着人类的变化和进步，概念也发生了变化和进步罢了。

(王 冰 译自《精密科学历史档案》
Vol. 38, NO. 2, 1988,
pp. 101—108)

(上接第30页)

许他只是装糊涂，经常有人这样认为。但我以为更有可能的是其它三个原因。第一，这个论证本身决不是一件简单的或直观上一目了然的事情。即使用足够的图表(伽利略没有提供)也难以作出清楚而恰当的说明。第二，他在《对话》中为这个证明所安排的位置不大高明，它应当放到第三天快结束，讨论过哥白尼的第三运动之后。第三，有几乎无可辩驳的证据表明，伽利略是在临近完稿时

提出他的证明的，离《对话》付印之前只有几个月。大概当时过份仓促(而不是缺乏认识)是使伽利略没有能很好地利用这个证明的原因。遗憾的是，这一证明比伽利略不惜化费大量时间和精力利用潮汐所作的论证有价值得多。

(钱善璿译自《ISIS》，1985，
76, 543—551, 丁蔚校)