

由固体潮发现引力以光速传播的观测证据

汤克云^{①②*}, 华昌才^③, 文武^①, 池顺良^④, 游庆瑜^①, 余丹^⑤

① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

② 中国科学院国家天文台, 北京 100012;

③ 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

④ 中国科学院大学计算地球动力学重点实验室, 北京 100049;

⑤ 中国地震台网中心, 北京 100045

* 联系人, E-mail: kytang@bao.ac.cn

2012-09-17 收稿, 2012-10-16 接受

摘要 由于太阳的真位置无法直接观测, 在实际使用的地球重力固体潮公式中用视位置近似代替真位置. 研究发现, 这种近似相当于隐含了一个假定, 即引力是以光速传播的. 本文从狮泉河站和乌什站的重力固体潮观测数据出发, 作了地球黏弹性相位滞后校正; 用减除月球引力潮理论值的办法从重力固体潮观测数据中提取出准太阳引力潮的观测数据; 推导出并求解了引力传播方程, 得出引力传播速度约为 0.93~1.05 倍的光速, 相对误差为 5%. 这是第一个强有力的观测证据, 证明了引力传播的速度与光速相同.

关键词

固体潮
视位置
相位滞后
光速
引力速度
引力传播方程

1 引力和地球固体潮

虽然提出引力理论的时间比电磁理论要早得多, 但是科学界对后者的理解更清楚, 而对于前者的性质还有许多疑问. 众所周知, 牛顿万有引力定律是一种超距作用理论, 即认为引力可以在瞬间传播至任何地方, 或引力的速度是无限的. 然而, 爱因斯坦的狭义相对论指出, 光速是所有物理速度的上限, 因此引力的速度应该是有限的. 此外, 广义相对论认为引力波应该以光速传播^[1-4]. 显然, 这些理论互相冲突. 要解决这样一个重大的理论难题, 我们需要完善的实验和观测结果, 而不是纯逻辑的争论. 由于重力不能被屏蔽, 且地球比较小, 在实验室中以至于在地球上测量引力传播速度是不可能的. 在此之前, 物理学家们还没有发现任何被广泛认可的方法来测量引力的传播速度, 更没有测量出引力的速度.

从 1997 年开始, 汤克云主持并实施了 6 次包括地球重力固体潮在内的日全食和日环食观测, 如

1997 年 3 月的漠河日全食观测, 2001 年 6 月的赞比亚日全食观测, 2002 年 12 月的澳大利亚日全食观测, 2008 年 8 月的嘉峪关日全食观测, 2009 年 7 月的上海-杭州-湖州日全食观测和 2010 年 1 月的云南大理日环食观测. 其中后 5 次主要是地球重力固体潮观测, 在观测中发现了一些“重力异常”现象, 所谓“重力异常”就是在日全食期间观测到的地球重力固体潮比理论值稍低. 本质上, 地球重力固体潮是由月球和太阳的引潮力引起的固体地球的形变. 这些引潮力作用于黏弹性的固体地球造成了地球质量的滞后重新分布, 这种滞后的质量重新分布产生了滞后的附加引力. 月球引潮力、太阳引潮力以及这一附加引力的矢量和构成了重力固体潮, 而滞后的附加引力造成了相位滞后, 即重力固体潮的观测曲线的相位滞后于固体潮的理论曲线^[5,6].

太阳引潮力的实用牛顿公式. 基于经典的牛顿万有引力公式, 地球物理学家和天体物理学家构建了地球重力固体潮模型. 在地球固体潮的经典牛顿

引用格式: 汤克云, 华昌才, 文武, 等. 由固体潮发现引力以光速传播的观测证据. 科学通报, 2013, 58: 907-911

英文版见: Tang K Y, Hua C C, Wen W, et al. Observational evidences for the speed of the gravity based on the Earth tide. Chin Sci Bull, 2013, 58: 474-477, doi: 10.1007/s11434-012-5603-3

公式中, 太阳或月球的位置都应是真位置, 但是, 太阳或月球的真位置无法直接观测, 可观测的是视位置, 于是, 人们用视位置近似代替真位置. 鉴于太阳或月球的轨道近似于圆, 从视位置到地球的距离与真位置到地球的距离相差很小, 按视位置到地球的距离算得的引力场强度与按真位置到地球的距离算得的引力场强度相差极小. 地球物理学界和天文学界以为: 以视位置代替真位置计算固体潮是个很好的近似. 但是, 没有人注意到, 如此构造的近似的实用牛顿公式与经典牛顿公式之间存在重大的差别. 例如, 实际使用的太阳引潮力近似公式, 即位于观测点的单位质量粒子(以下将单位质量粒子简称为粒子)受到的太阳引潮力(即太阳引潮力场)可用下式表达:

$$\vec{S}(O, t) = -\frac{GM_s}{r_*^3(t_*)} \vec{r}_*(t_*) + \frac{GM_s}{R_*^3(t_*)} \vec{R}_*(t_*). \quad (1)$$

我们称其为太阳引潮力场的实用牛顿公式, 其中 GM_s 依次为万有引力常数和太阳质量, \vec{r} 和 \vec{R} 分别为从太阳中心到观测点和到地球中心的位置矢量. 太阳引潮力场的实用牛顿公式(1)右侧是两项之差: 第一项是观测点粒子受到的太阳引力, 即观测点的太阳引力场, 或观测点粒子相对于太阳的引力加速度. 第二项是位于地球中心的粒子受到的太阳引力, 即地心处的太阳引力场, 即地心相对于太阳的引力加速度. (1)式中, 下标有“*”的所有位置都是视位置, t_* 是太阳到达视位置的时刻^[5,6]. 在漠河和赞比亚日全食观测后, 我们曾试图用类似于电动力学推迟势的推迟引力去解释“重力异常”^[7,8]. 现在知道, 在漠河、赞比亚和澳大利亚观测到的“重力异常”是当时当地的环境干扰造成的. 所谓推迟引力就是考虑观测者相对于引力源的运动, 且引力是从推迟位置以光速传播至观测点的引力理论. 根据(1)式计算的太阳引潮力场, 相当于是在时刻 $t_* = t - r_*/c$, 从太阳的视位置发出的, 有一个时间滞后 ($\Delta t \equiv r_*/c$), 而不是在观测时刻 t 发出的. 在确认当今地球物理学和天文学实际使用的地球重力固体潮公式中的太阳和月球位置就是视位置后, 汤克云意识到, 这一点正好与推迟引力的理论相符: 视位置相当于推迟位置, 视位置时刻相当于推迟时刻¹⁾. 于是提出了以下命题: 目前使用

的固体潮实用牛顿理论公式实际上暗含着引力以光速传播的假设^[9-12].

如(1)式所示, 引力从太阳发出的时间和到达地面观测点的时间是不一样的. 而经典的牛顿万有引力定律认为, 引力从引力源发出的时间与观测点接收到的时间是相同的, (1)式与牛顿理论矛盾. 换句话说, 根据实用牛顿公式(1), 我们在地面观测点 O 在时刻 t 接收到的太阳引力和看到的太阳光都是在时刻 t_* 从太阳视位置发出的, 引力从太阳视位置传播至地面观测点所经历的时间间隔当然等于光线从太阳视位置传播到地面观测点的时间间隔, 对于月球潮汐公式也是如此. 这明确告诉我们, 由太阳引潮力和月球引潮力组成的实用固体潮牛顿理论公式确实隐含着引力以光速传播的假定.

根据太阳引潮力的实用牛顿理论公式, 从太阳视位置对应的推迟时刻 t_* 出发, 加上滞后时间间隔 Δt , 我们就可计算太阳的真位置. 由此真位置计算太阳引潮力相当于构建了一个太阳引潮力的瞬时传播公式, 即太阳引潮力的经典牛顿理论公式.

2 太阳引潮力的传播方程

现在, 我们单独研究太阳引潮力. 先研究观测曲线和实用牛顿理论曲线分别到达零潮点的时间差异. 经分析, 此时间差异主要有两个来源: 第一是由于黏弹性地球对太阳引潮力的响应延迟造成的相位滞后, 第二是太阳以实际速度从太阳视位置传播到地面观测点所需的时间与太阳以理论速度(即光速)从太阳视位置传播到地面观测点所需的时间之差. 假定引力的实际传播速度 u 与理论速度(光速 c)有所不同, 导出的太阳引力传播方程是²⁾

$$t_{\text{corr}}^{\text{obse}} - t_{\text{prac}}^{\text{theo}} = \frac{r_*}{u} - \frac{r_*}{c}. \quad (2)$$

在(2)式的左侧, $t_{\text{corr}}^{\text{obse}}$ 是经相位滞后校正后的观察曲线与零潮线相交的时间, $t_{\text{prac}}^{\text{theo}}$ 是按实用牛顿公式(1)计算出的理论曲线与零潮线相交的时刻, 所以(2)式的左侧是校正后的观察曲线和实用牛顿理论曲线之间的时间差. 在(2)式的右侧, 第一项是引力以真实速度 u 从太阳视位置传播到地面观测点所需的时间, 第

1) 汤克云. 引力场以光速传播的证据和推迟引力. 中国预印本服务系统, 2010-06-13

2) 汤克云. 关于引力场传播速度的原理和方程. 中国预印本服务系统, 2010-09-06

二项是引力以理论速度(光速)从太阳视位置传播到地面观测点所需的时间,所以方程右侧也是引力以实际速度传播所需的时间间隔与以理论速度传播所需的时间间隔之差.如果观察数据和数据校正是正确的,则(2)式的两侧具有相同的物理意义,它们应彼此相等^[10-12].如果我们记 $\delta = t_{\text{corr}}^{\text{obse}} - t_{\text{prac}}^{\text{theo}}$, $u = \alpha c$ 和 $\varepsilon = r_s/c$, 则(2)式可改写为

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\alpha} - \varepsilon.$$

然后,可得

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \delta}. \quad (3)$$

3 对太阳引潮力的研究方法和初步结果

我们从西藏狮泉河(简称 SQH)固体潮站和新疆乌什(简称 WS)固体潮站各选取 3 d 的数据,这些数据是由配置了铷原子钟的高精度 PET 弹簧重力仪观测和记录的.重力仪测到的是重力固体潮在垂直方向的分量,相应地,根据理论公式所计算的重力固体潮也是在垂直方向的投影.这两个站都位于中国西部边界内侧,距太平洋、印度洋、北冰洋和大西洋都很远,所以,海洋潮汐对这两个站的影响非常微弱.首先,我们使用截止频率为 0.01 Hz 的低通滤波器滤掉高频干扰;其次,我们作了 37 s 的相位滞后校正,这 37 s 是根据 Ray 等人^[13,14]的 0.16° 和 0.20°(相当于 38 s 或 48 s)及 Arabelos 的 0.104°(相当于 25 s)^[15]所作的平均;第三,我们根据观测数据计算出潮汐因子 γ ——校正后的地球固体潮观测曲线与根据实用牛顿理论公式(J2000, JPL)计算出的固体潮理论曲线之振幅比,将观测曲线的幅度除以潮汐因子 γ 使观测曲线的幅度与实用牛顿理论曲线的幅度相等,即令观测曲线归一化;第四,我们从以上校正并归一化的观测数据中减去月球引潮力的实用牛顿理论值而构建了一个准太阳潮观测曲线;第五,比较准太阳潮观测曲线与太阳潮实用牛顿理论曲线分别与零潮线相交的时刻,得到了表 1 中的时间差 δ ;第六,计算出太阳光从太阳视位置传播到地球的时间间隔,即表 1 中的 ε ;最后,根据(3)式计算出引力传播速度与光速之比 α .

在实际计算中,经过滤波,经过漂移和滞后校正后,即可对太阳潮观察曲线和太阳潮牛顿理论曲线进行直接比较.我们发现,观察曲线与经典牛顿理论曲线之间有较大的相位差异,而与实用牛顿理论曲

线之间的相位差很小.至此,我们已可得出一个初步的结论:引力超距作用的概念是不对的,而以光速传播的假定可能是正确的.

进一步,将校正后的乌什站和狮泉河站各 3 d (2009 年 7 月 7 日、7 月 22 日和 8 月 5 日)观测数据代入传播方程(3)求解,获得了引力传播速度与光速之比 α , 列于表 1 中.相关数据曲线如图 1~3 所示.

图 2 和 3 是太阳引潮力场观测曲线与理论曲线在零潮线附近的放大图.图中的黑色曲线表示经 37 s 相位滞后校正后的观测曲线,红色曲线是黑色曲线的拟合曲线,蓝色曲线表示实用牛顿理论曲线,绿色曲线表示经典牛顿理论曲线,实用牛顿理论曲线和经典牛顿理论曲线之间的时间差表示光线从太阳视

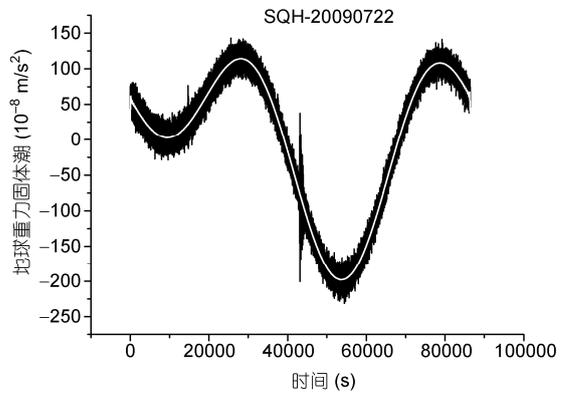


图 1 狮泉河(SQH)站 2009 年 7 月 22 日的地球重力固体潮观测数据
黑色曲线为原始观测曲线,白色曲线为经过 0.01 Hz 低通滤波后的曲线

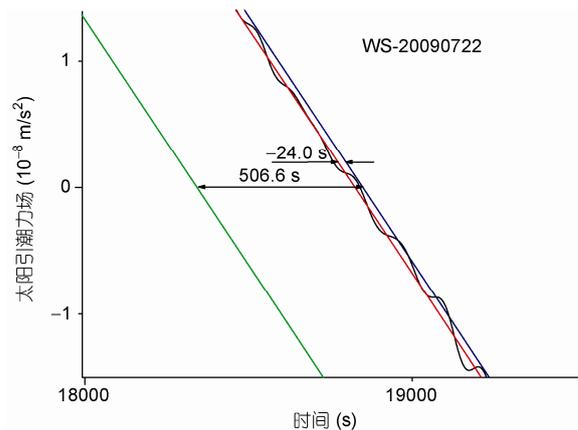


图 2 2009 年 7 月 22 日乌什站(WS)准太阳引潮力场的观察曲线、经典牛顿理论曲线和实用牛顿理论曲线在零潮线附近的放大图

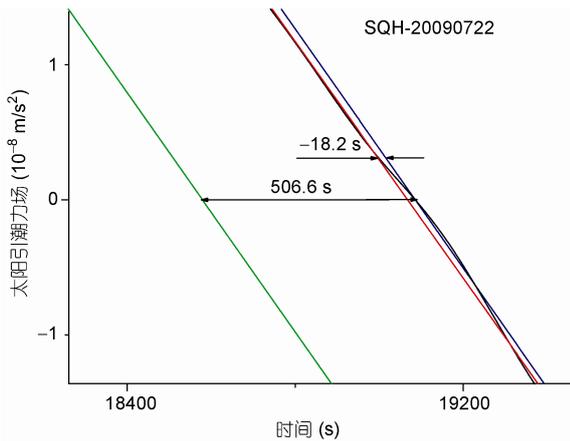


图3 2009年7月22日狮泉河站(SQH)准太阳引潮力场的观察曲线、经典牛顿理论曲线和实用牛顿理论曲线在零潮线附近的放大图

位置传播至地面观测点所需的时间,也即实用牛顿公式(1)假定的引力从太阳视位置传播至地面观测点所需的时间,即表1中的 ε ,红线和蓝线之间的时间差表示引力和光线分别从太阳传播至地面观测点的时间差,即表1中的 δ .

由传播方程(2)和(3),计算出乌什站(WS)和狮泉河(SQH)两个观测站各3d的引力速度与光速之比,如表1所示.

表1中, ε 是光线从太阳的视位置传播到地面站所需的时间,也即实用牛顿公式(1)假定的引力从太阳视位置传播至地面观测点所需的时间, δ 是校正后的观测曲线和实用牛顿理论曲线分别与零潮线的交点之间时间差, α 是引力速度因子,即引力速度与光速之比.由表1我们可以看到,引力速度因子分别为0.93~1.05.

4 引力速度的误差估算

主要的误差来源有三个.

表1 根据准太阳潮数据求得的引力速度与光速之比

日期	台站	ε (s)	δ (s)	α
2009-07-07	WS	507.1	+5.9	0.99
2009-07-22	WS	506.6	-24.0	1.05
2009-08-05	WS	505.9	36.6	0.93
2009-07-07	SQH	507.1	+8.6	0.98
2009-07-22	SQH	506.6	-18.2	1.04
2009-08-05	SQH	505.9	-14.2	1.03
平均值		506.5	-0.9	1.00 ⁺

(1) 观测误差 $\Delta\varepsilon$ 小于1s,可以忽略不计;

(2) 平均拟合误差 $|\Delta\delta_1|$,即平滑曲线与实时曲线之间的时间差,约5s;

(3) 太阳潮相位滞后改正的误差 $|\Delta\delta_2|$,根据Ray等人^[13]的结果,约为0.09°或21.6s.据此,我们可以求出引力速度因子的相对误差的平均值:

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \delta},$$

$$\left| \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right| = \frac{|\Delta\varepsilon| \left| \frac{\delta}{\varepsilon + \delta} \right| + |\varepsilon| \left| \frac{\Delta\delta}{\varepsilon + \delta} \right|}{\left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon + \delta} \right|} \approx \frac{\varepsilon |\Delta\delta|}{|\varepsilon(\varepsilon + \delta)|},$$

$\left| \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right|$ 的平均值

$$\approx \frac{|\Delta\delta|}{\bar{\varepsilon} + \bar{\delta}} = \frac{|\Delta\delta_1| + |\Delta\delta_2|}{\bar{\varepsilon} + \bar{\delta}} \approx \frac{5.0 + 21.6}{506.5 - 0.9} \approx 5\%,$$

其中 $\bar{\varepsilon}$ 和 $\bar{\delta}$ 分别为 ε 和 δ 的平均值.总之,根据我们的理论、方程、方法和固体潮数据求得引力速度是光速的0.93~1.05倍(表1),平均相对误差约为5%.

5 结论和讨论

牛顿引力定律取得了极大成功,但未能考虑引力的传播.从新疆乌什站和西藏狮泉河站的固体潮观测数据出发,我们发现了引力以光速传播的第一个观测证据.本文中的引力一般指单位质量粒子受到的引力,即引力场.我们之所以选择如表1所示的3天,是因为在那些日子里,月球处于“新月”或“满月”,太阳、地球和月球几乎共线,太阳、地球和月球之间的几何关系简单,用校正重力固体潮数据减去月球引力潮理论值来构造准太阳引力潮是合理可行的.推广而言,任何地球物理学家或天文学家按照本文给出的物理思想、引力传播方程和数据处理方法,用任何远离海洋的固体潮观测站的、有一定数量的任何“新月”或“满月”时的高精度固体潮数据,都可以获得引力场以光速传播的结论.近年来,徐建桥等人^[16]用位于拉萨的超导重力仪(SG)记录了反映地球固态内核平移振荡的数据,他们还特别研究了在拉萨的重力潮汐变化^[17].显然,超导重力仪的观测数据比弹簧重力仪更稳定、更准确.如果我们使用拉萨固体潮站的超导重力仪测数据,当可更准确地获得到引力的传播速度.此外,如果我们有这些观测站更丰富的数据,我们还可以更准确地计算出各观测站的黏弹性相位滞后的具体值并改进各观测点的校正值.

致谢 感谢中国地震台网中心潘怀文和李正媛提供乌什站和狮泉河站的地球固体潮数据, 池毅、黄旭春、刘建明、刘端法和卢红艳提供技术及其他支持, 郝钦文与我们的有益讨论, 李惕培院士和滕吉文院士推荐本文.

参考文献

- 1 Einstein A. *The Meaning of Relativity*. 5th ed. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1954
- 2 Hartle J B. *Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity*. San Francisco: Addison Wesley, 2008
- 3 Ohanian H C. *Gravitation and Spacetime*. New York: W. W. Norton & Company, Inc. 1976
- 4 H.瓦尼安, R.鲁菲尼. 向守平, 冯珑珑, 译. *引力与时空*. 北京: 科学出版社, 2006
- 5 Melchior P. *The Tides of Planet Earth*. New York: Pergamon Press, 1978
- 6 Agnew D C. Earth tides. In: Herring T, ed. *Treatise on Geophysics*. Oxford: Elsevier, 2007. 163–195
- 7 Tang K Y, Zhang H, Wang Q, et al. Gravity effects of solar eclipse and induced gravitational field. In: *Abstract Book, American Geophysical Union, Fall Meeting 2003, #G32A-0735*
- 8 Tang K Y. The retarded gravitation and paleogravity. In: *27th General Assembly of International Astronomy Union, Rio de Janeiro, Brazil, 2009. Abstract Book, 44–45*
- 9 汤克云. 日全食与挑战爱因斯坦的摆. *中国国家天文*, 2009, 11: 40–45
- 10 汤克云. 引力场以光速传播的观测证据. 见: *中国引力与相对论天体物理年会报告, 2010*
- 11 Tang K Y. Observational evidences to show that gravitational field travels at the speed of light. In: *2010 International Workshop on Gravitational Waves Detection with Atom Interferometer, 2010*
- 12 Tang K Y, Wen W, Hua C C, et al. Observational evidences for the propagation speed of gravity. In: *Abstract Book of 28th General Assembly of International Astronomy Union, 2012. 938–939*
- 13 Ray R D, Eanes R J, Chao B F. Detection of tidal dissipation in the solid Earth by satellite tracking and altimetry. *Nature*, 1996, 381: 595–597
- 14 Ray R D, Eanes R J, Lemoine F G. Constraints on energy dissipation in the Earth's body tide from satellite tracking and altimetry. *Geophys J Int*, 2001, 144: 471–480
- 15 Arabelos D. Comparison of Earth-tide parameters over a large latitude difference. *Geophys J Int*, 2002, 151: 950–956
- 16 徐建桥, 孙和平, 周江存. 内核平动三重谱线的实验探测. *科学通报*, 2009, 54: 3483–3490
- 17 徐建桥, 陈晓东, 周江存, 等. 拉萨重力潮汐变化特征. *科学通报*, 2012, 57: 2094–2101