



郝晓光, 胡小刚, 刘根友, 等. 2014. 一种验证引力速度可能的实验方法——与汤克云研究员和黄超光研究员商榷. 地球物理学进展, 29(6): 2956-2958, doi:10.6038/pg20140669.

HAO Xiao-guang, HU Xiao-gang, LIU Gen-you, et al. 2014. A possible method of testing the gravity speed——With Tangkeyun and Huangchaoguang researchers. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 29(6): 2956-2958, doi:10.6038/pg20140669.

# 一种验证引力速度可能的实验方法——与汤克云研究员和黄超光研究员商榷

## A possible method of testing the gravity speed——With Tangkeyun and Huangchaoguang researchers

郝晓光, 胡小刚, 刘根友, 薛怀平, 段鹏硕

HAO Xiao-guang, HU Xiao-gang, LIU Gen-you, XUE Huai-ping, DUAN Peng-shuo

中国科学院测量与地球物理研究所, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077

State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

**摘要** 我国学者不久前进行了利用重力固体潮观测资料验证广义相对论关于引力速度等于光速的研究。汤克云研究员的论文认为, 重力固体潮观测资料验证了引力速度等于光速; 而黄超光研究员的论文则认为, 汤克云论文的重力固体潮观测分析与引力速度无关。本文认为, 由于时间测量精度比重力测量精度要高得多, 所以进行这项研究, 走时间测量的技术路线应该比走重力测量的技术路线更为现实, 从而提出了基于地球引力的“GPS卫星实验方案”。

**关键词** 广义相对论; 引力速度; 重力测量; 时间测量

中图分类号 P312

文献标识码 A

doi:10.6038/pg20140669

**Abstract** Recently some scholars in our country made use of gravity tidal observation data to validate the theory of general relativity about the gravitational velocity equals the speed of light. The research paper of professor Tangkeyun indicates that the tidal gravity observation data verify the gravitational velocity equals the speed of light; however, the research paper of professor Huangchaoguang shows that Tang's analysis of the tidal gravity observation data has nothing to do with the speed of gravity. This paper argues that the time measurement precision is much higher than gravity, hence, it is more realistic to validate the gravity speed in time measurement; and proposes the “GPS satellite experiment scheme” based on the gravity of the Earth.

**Keywords** general theory of relativity; gravity speed; gravity measurement; time measurement

### 1 相对论的基本概念

麦克斯韦(James Clerk Maxwell)理论认为, 磁铁运动产生电场, 而导体运动不产生电场; 但爱因斯坦却认为, 当一个导体和磁铁相对运动时, 在导体里产生的电流并不取决于两者哪个在运动。洛伦兹(Hendrik Antoon Lorentz)认为, 力学处于一个优越的地位, 而电动力学是从属的; 但爱因斯坦却认为, 力学与电动力学是平权的, 力学和电磁学必须服从共同的原则。于是爱因斯坦指出: 不能给予同时性这个概念以任何绝对的意义, 两个事件, 从一个坐标系看来是同时的, 而从另一个相对于这个坐标系运动的坐标系来看, 就不能再被认为是同时的事件了。基于这个思想, 爱因斯坦提出了狭义

相对论的“相对性原理”: 凡是对力学方程适用的一切坐标系, 对电动力学和光学也一样适用。爱因斯坦同时坚持“相对性原理”和“光速不变”, 从而得出了狭义相对论的“速度延缓时间原理”, 即: 速度越快, 时间越慢。

狭义相对论还不完善, 不能处理加速度和引力现象。创立狭义相对论之后, 爱因斯坦基于把“相对性原理”贯彻到底的信念和认识论的原则, 一鼓作气又创立了广义相对论。

牛顿力学认为: 惯性系比其它坐标系都要特殊, 且速度是相对的而加速度是绝对的。对此, 爱因斯坦不以为然, 因为伽利略早就发现: 一切物体在引力场中都具有同一加速度, 即物体的惯性质量同它的引力质量相等。爱因斯坦从这一事实想到了“等效原理”。等效原理也称为“广义相对性原理”,

收稿日期 2014-09-21; 修回日期 2014-11-01. 投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 国家自然科学基金项目(41374029 41021003)资助。

作者简介 郝晓光, 男, 1958年出生, 博士, 研究员, 长期从事地球物理学的理论研究。(E-mail: hxg@whigg.ac.cn)

爱因斯坦在这里把狭义相对论的“相对性原理”推广到了加速系:如果在一个引力场里不是引进一个惯性系,而是引进一个相对于它作加速运动的参考系,那么事物就会像在没有引力的空间里那样行动。根据“等效原理”,爱因斯坦得出了广义相对论的“引力延缓时间原理”,即:引力越大、时间越慢。

## 2 我国学者不久前的工作

狭义相对论以光速为尺度,认为速度越快时间越慢;而广义相对论以引力为尺度,认为引力越大时间越慢。所以总的来说,“引力问题”不是狭义相对论问题而是广义相对论问题。但是,也有学者试图把狭义相对论的尺度和广义相对论的尺度统一起来、也就是把光速和引力速度统一起来,提出了引力速度等于光速的观点(Ohanian *et al.*, 1976; Hartle J B, 2008)。

不久前,汤克云研究员等发表论文(Tang *et al.*, 2013),认为从重力固体潮的观测资料中证实了引力速度等于光速。随后,黄超光研究员发表论文(Huang, 2013),认为汤克云的重力固体潮观测分析与引力速度无关。

实际上,采用重力测量的方法探测引力速度是很困难的。为了探测引力波,马里兰大学的 Joseph Weber 教授于 1959 年发明了室温下工作的谐振质量引力波探测器, Ho Jung Paik 教授根据其发现的谐振传感器的概念,采用低温超导技术,设计了双模超导传感器去实现引力波探测、并设计了超导重力梯度仪,但是并没有在引力波探测方面取得成功。意大利物理学家 Majorana 关于重力吸引的实验和假说(Liu *et al.*, 2004),引起了在日全食期间探测引力波的研究。1997 年 3 月,王谦身等在漠河日全食期间利用高精度重力仪实施了观测,发现了“重力谷”现象(王谦身等, 2001)。2009 年 7 月,方剑等在长江日全食期间利用高精度重力仪实施了观测,但并未发现“重力谷”现象(崔荣花等, 2011)。

目前,重力测量的精度为  $10^{-6}$  至  $10^{-7}$  量级,而时间测量的精度则已达到了  $10^{-12}$  量级,所以时间测量精度比重力测量精度要高得多;另外,重力测量受外界干扰较大(如海潮、大气、地下水等),而时间测量干扰较小,也就是说,从观测精度上来说,走时间测量的技术路线应该比走重力测量的技术路线更为现实。因此,与汤克云研究员基于日月引力的“重力固体潮实验方案”不同,我们提出基于地球引力的“GPS 卫星实验方案”。

## 3 GPS 卫星相对论效应的影响

### 3.1 狭义相对论效应的影响

根据狭义相对论的“速度延缓时间原理”:速度越快、时间越慢。在地面上具有频率为  $f_0$  的时钟,安设在以速度  $V_s$  运行的卫星上后,钟频将发生变化,其改变量为(因为卫星相对地球运行速度很快,所以卫星上的时钟将变慢)(周忠谟等, 1999):

$$\Delta f_1 = -\frac{V_s^2}{2c^2} f_0,$$

因为  $V_s^2 = ga_m \left( \frac{a_m}{R_s} \right)$

$$\text{所以: } \Delta f_1 = -\frac{ga_m}{2c^2} \left( \frac{a_m}{R_s} \right) f_0, \quad (1)$$

式中:  $a_m$  为地球平均半径,  $R_s$  为卫星轨道平均半径。

### 3.2 广义相对论效应的影响

根据广义相对论的“引力延缓时间原理”:引力越大、时间越慢。于是,处于不同等位面的时钟,其频率  $f_0$  将由于引力位不同而产生变化,这种引力频移的量的大小为(因为卫星相对地球很远、引力很小,所以卫星上的时钟将变快)(周忠谟等, 1999):

$$\Delta f_2 = \frac{\Delta W}{2c^2} f_0,$$

因为  $\Delta W = ga_m \left( 1 - \frac{a_m}{R_s} \right)$

$$\text{所以: } \Delta f_2 = \frac{ga_m}{2c^2} \left( 1 - \frac{a_m}{R_s} \right) f_0. \quad (2)$$

### 3.3 狭义相对论与广义相对论合并效应的影响

$$\Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2 = \frac{ga_m}{2c^2} \left( 1 - \frac{3a_m}{2R_s} \right) f_0,$$

$$f_0 = 10.23 \text{ MHz}, \Delta f = 0.00455 \text{ Hz}$$

将以上频率影响  $\Delta f$  换算成时间影响  $\Delta t$ :

$$\Delta t = f_0 \left( \frac{1}{f_0} - \frac{1}{f_0 + \Delta f} \right) = 0.45 \text{ ns/s}. \quad (3)$$

这就是说,受狭义相对论和广义相对论的合并影响, GPS 卫星钟比地面钟要快 0.45 ns/s,也就是 38  $\mu\text{s/d}$ ;其中:广义相对论效应影响为 45  $\mu\text{s/d}$ ,狭义相对论效应影响为 -7  $\mu\text{s/d}$ 。如果按照 1 纳秒误差对应的定位精度为 0.3 m,那么广义相对论的 45  $\mu\text{s/d}$  的误差影响所对应的定位精度为  $45 \times 1000 \times 0.3 = 13500 \text{ m/d} = 13.5 \text{ km/d}$

## 4 基于地球引力的“GPS 卫星实验方案”

GPS 卫星的平均高度为 20200 km(光速约需要 1/15 s),月亮到地球的距离约 38 万 km(光速需 1 秒多),太阳到地球的距离约 1.5 亿 km(光速约需 500 秒)。目前 GPS 的观测精度为毫米级, GPS 卫星钟的精度为纳秒( $10^{-9}$ )级。我们的“GPS 卫星实验方案”的技术思路是:采用时间测量的方法,验证 GPS 卫星受地球引力的广义相对论效应(45  $\mu\text{s/d}$ ),是否受到 1/15s 延迟的影响,以此来验证引力按光速传播。具体方案如下:

设在地球表面上一台 GPS 接收机为 A,空间一颗 GPS 卫星为 B,设引力速度为  $u, u = \alpha c$  ( $c$  为光速,  $\alpha \leq 1$  为比例系数)。

那么,由 A 点时刻归算到地心时刻为

$$T_A = t_A + \Delta t_{GA} + \Delta t_{\text{延迟}A}, \quad (4)$$

式中:  $T_A$  为地心时钟时刻,  $t_A$  为地面时钟时刻,  $\Delta t_{GA}$  为地球引力在 A 产生的广义相对论效应对时间的影响,  $\Delta t_{\text{延迟}A}$  为引力速度由地心传播至 A 所产生的时间延迟;而  $\Delta t_{\text{延迟}A} = \frac{r_e}{u}$ ,  $r_e$  为地球质心到 A 点的距离。同理,我们可得到由 B 推算到质心的时间为

$$T_B = t_B + \Delta t_{GB} + \Delta t_{\text{延迟}B}, \quad (5)$$

且  $\Delta t_{\text{延迟}B} = \frac{r_s}{u}$ ,  $r_s$  为地球质心到 B 点的距离。因  $T_A = T_B$ , 所以

$$t_A + \Delta t_{GA} + \frac{r_e}{u} = t_B + \Delta t_{GB} + \frac{r_s}{u}, \quad (6)$$

由(6)式可得:

$$\alpha = \frac{r_s - r_e}{c[(t_A - t_B) + (\Delta t_{GA} - \Delta t_{GB})]}, \quad (7)$$

式中:  $(r_s - r_e)$  为 GPS 卫星高度(约 20200 km),  $(\Delta t_{GA} - \Delta t_{GB})$  为公式(2)给出的广义相对论影响(约  $45 \mu\text{s/d}$ ),  $(t_A - t_B)$  为地面 GPS 接收机时钟与 GPS 卫星时钟之差.

也就是说,在(7)式中,  $(r_s - r_e)$  和  $(t_A - t_B)$  为可观测量.  $(t_A - t_B)$  为时间观测量,而  $(r_s - r_e)$  也可以换算成时间观测量.

于是,由  $(t_A - t_B)$  和  $(r_s - r_e)$  这两个时间观测量,就可以由公式(7)计算出比例系数  $\alpha$ , 从而进行引力速度等于光速的验证;如果计算出的比例系数  $\alpha$  接近 1, 则可认为引力速度等于光速.

## References

- Hartle J B. 2008. Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity[M]. San Francisco: Addison Wesley.
- Ohanian H C. 1976. Gravitation and Spacetime[M]. New York: W. W. Norton & Company, Inc.
- Tang K Y, Hua C C, Wen W, *et al.* 2013. Observational evidences for the speed of the gravity based on the Earth tide [J]. Chin Sci Bull, 58: 474-477.

- Huang C G. 2013. The observation of the Earth tide is irrelevant to the speed of gravity[J]. Chin Sci Bull, 58: 3291-3294.
- Liu Shaoming, van Ruymbek M. 2004. Search for Gravitational Absorption Effect During Total Solar Eclipse of August 11, 1999 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 25(4): 99-104.
- Wang Qianshen, Yang Xinshe, Tang Keyun. 2001. Gravity anomaly during the Mohe total solar eclipse[J]. Chin Sci Bull (in Chinese), 46(12): 1044-1048.
- Cui Ronghua, Fang Jian, Wang Xinsheng. 2011. Gravity Observation During 22 July 2009 Total Solar Eclipse in Hubei Province [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University (in Chinese), 36(11): 1332-1335.
- Zhou Zhongmo, Yi Jiejun, Zhou Qi. 1999. The principle and application of the GPS satellite measurement [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press (in Chinese).

## 附中文参考文献

- 汤克云, 华昌才, 文武, 等. 2013. 由固体潮发现引力以光速传播的观测证据[J]. 科学通报, 58: 907-911.
- 王谦身, 杨新社, 汤克云. 2001. 漠河日全食期间的重力异常[J]. 科学通报, 46(12): 1044-1048.
- 崔荣花, 方剑, 王新胜. 2011. 2009-07-22 湖北地区日全食期间的重力观测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 36(11): 1332-1335.
- 周忠谟, 易杰军, 周琪. 1999. GPS 卫星测量原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社.