

· 研究简报 ·

## 谐和条件下的干涉仪实验

崔世治 余招贤  
(中山大学物理学系)

**摘 要** 本文就地球引力场中一个“回波”实验,讨论了周培源教授关于谐和条件的地位和物理长度的新观点与广义相对论传统观点在实验结果的理论预言上的差异,及观测这一差异的可能性。

**关键词** 广义相对论,干涉仪实验

在广义相对论中,球对称质量外部引力场的线元为(本文采用几何单位,  $c=G=1$ )

$$ds^2 = -\left(\frac{r-m}{r+m}\right) dt^2 + \left(\frac{r+m}{r-m}\right) dr^2 + (r+m)^2 (d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \quad (1)$$

它满足谐和条件。

由于通常把物体的物理长度理解为固有长度:  $dl = [(g_{ik} - g_{0i}g_{0k}/g_{00})dx^i dx^k]^{1/2}$ , 当用静止于某点上的标准钟  $d\tau = \sqrt{-g_{00}} dt$  去测量时,在该点附近,光速( $dl/d\tau$ )恒为1。但由于引力场中各个点上钟的时率并不一致,当从一点去看有限距离的“雷达回波”时,其平均光速( $|dl|/\Delta\tau_0$ )将略异于1,并且是各向异性的。这一效应原则上可籍地面上竖直放置的干涉仪检出。

周培源教授在一些报告和文章中提出了一些新观点<sup>[1~4]</sup>,其中涉及谐和条件和坐标的物理意义。他的观点可概括如下:①存在一个闵氏空间,在其中定义 Descarts 坐标和时间;②黎曼度规  $g_{\mu\nu}$  描述引力场,它满足 Einstein 场方程和谐和条件;③空间距离由 Descarts 坐标差直接决定。

周培源教授建议一个光速各向异性实验来检验他的观点<sup>[5]</sup>,本文作者曾就此进行过讨论<sup>[6]</sup>。本文讨论一个干涉仪实验。按照传统的标准观点(以下称之为观点A)对这一实验结果的理论预期,与按周培源教授的观点(以下称观点B)的预期是不相同的。本文并讨论了从实验上观测这一差异的可能性。

### 1 干涉仪实验的理论计算

如图1所示,干涉仪在地球表面竖直平面内转过 $90^\circ$ ,干涉条纹的移动由固有时之差  $\Delta\tau = \Delta\tau_{ACA} - \Delta\tau_{ABA}$  决定。横向光子在引力场中有一定下落,实际光径为  $AB$ 。但为方便不妨按  $AD$  或  $AB'$  进行计算,事实上三者相差极小。从量级上估计,  $\tau_D - \tau_{B'} =$

本文1992年1月9日收到

$(r_0/\cos\varphi) - r_0 \sim l^2/2r_0 \sim 10^{-7} l$  ( $r_0$  为地球半径,  $l \sim 1\text{m}$ ).

下面在谐和坐标系中分别按观点A和B计算  $\Delta r$  及条纹移动。设两臂的长度均为  $l$ 。

(1) 先考虑臂长很短(忽略度规变化)的情形。光线往返的坐标时为

$$\Delta t_{ACA} = 2 \int_{r_0}^{r_0+\Delta r} \frac{r+m}{r-m} dr \approx 2 \frac{r_0+m}{r_0-m} \Delta r \quad (2)$$

$$\Delta t_{AB'A} = 2 \int_0^\varphi \frac{(r+m)^{3/2}}{(r-m)^{1/2}} d\varphi \approx 2 \frac{(r_0+m)^{3/2}}{(r_0-m)^{1/2}} \varphi \quad (3)$$

由此得  $\Delta\tau = \Delta\tau_{ACA} - \Delta\tau_{AB'A}$   
 $= 2\sqrt{(r_0+m)/(r_0-m)} \Delta r - 2(r_0+m)\varphi$

观点A:

$$l_{AC} = \sqrt{(r_0+m)/(r_0-m)} \Delta r = l = l_{AB'} \\ = (r_0+m)\varphi$$

得  $\Delta\tau_A = 2l - 2l = 0$  (4)

干涉条纹移动  $n_A = 0$ 。

观点B:

$$l_{AC} = \Delta r = l = l_{AB'} = r_0\varphi$$

得  $\Delta\tau_B \approx m^2 l / r_0^2$ ,  $n_B = 2\Delta\tau_B / \lambda \approx 2m^2 l / \lambda r_0^2$  (5)

其中  $\lambda$  为光波波长。

(2) 臂长有限, 度规变化不能忽略时,

$$\Delta t_{ACA} = 2 \left[ \Delta r + 2m \ln \frac{r_0 + \Delta r - m}{r_0 - m} \right] \quad (6)$$

而  $\Delta t_{AB'A}$  仍如(3)式(按圆弧线算)。

观点A:

$$l_{AC} = \int_{r_0}^{r_0+\Delta r} \sqrt{\frac{r+m}{r-m}} dr = l = l_{AB'} = (r_0+m)\varphi$$

经过冗长的近似计算, 弃去三级小项, 得到

$$\Delta\tau_A \approx 2 \left[ l - (ml^2/2r_0^2) \right] - 2l \approx - (ml^2/r_0^2) \quad (7)$$

这与张元仲用“标准”坐标所作的类似计算的结果相同<sup>[7]</sup>。

观点B:

因为  $\Delta r = r_0\varphi = l$

所以有  $\Delta\tau_B \approx m^2 l / r_0^2 - 2ml^2 / r_0^2$  (8)

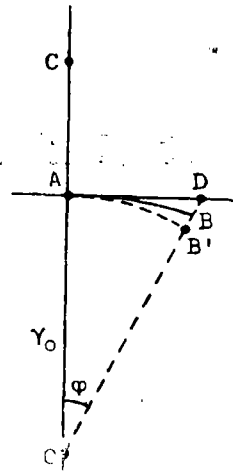


图1 干涉仪示意图

Fig. 1 Sketch of the interferometer

## 2 讨论

(1) 两种观点对  $\Delta\tau$  的预期值的差异包含两部分, 其中  $\Delta\tau_1 \sim m^2 l / r_0^2$  纯粹来自长度定义的不同; 另一部分  $\Delta\tau_2 \sim -ml^2 / r_0^2$  表现为使传统观点所预言的效应增大一倍。对地球来说,  $m \approx 0.44\text{cm}$ , 只有当  $l \lesssim 10^{-1}\text{cm}$  时,  $\Delta\tau_1$  才凸现出来。若取  $\lambda \sim 1\mu\text{m}$ , 则条纹移动  $n \lesssim 10^{-14}$ , 这看来是太微弱了。另一方面, 当  $l \gg m$  时,  $\Delta\tau_2$  项是主导的, 随着臂长的增加,  $\Delta\tau_A$ 、 $\Delta\tau_B$  以及它们之间的差异均按  $l^2$  增加。但  $l$  显然有一个限度。一是实验条件的限制, 二是上述计算中所作的近似对臂长也有限制。若设  $l = 1\text{m}$ , 则  $|n_A| \approx 2 \times 10^{-10}$  而  $|n_B| \approx 4 \times 10^{-10}$ 。用多次反射的办法或许能使效应增强。归根结蒂, 雷达回波实验被称为广义相对论的第四类验证, 在地面实验室中进行这类验证是值得追求的。一旦检测  $n_A$  的精度能够达到, 对  $n_A$  和  $n_B$  作出鉴别也不会太困难。

(2) 若将竖直臂的姿态改为向下, 对有限臂长重复上述计算, 则结果是:

$$\Delta\tau_A = +ml^2 / r_0^2, \quad \Delta\tau_B = +m^2 l / r_0^2 + 2ml^2 / r_0^2$$

取“向上”和“向下”二者平均, 则  $\bar{n}_A = 0$ , 而  $\Delta\tau_1$  项将剩下来,  $\bar{n}_B = 2m^2 l / \lambda r_0^2 \sim 10^{-12}$ 。 ( $l \sim 1\text{m}, \lambda \sim 1\mu\text{m}$ .)

(3) 由于材料不可能是绝对刚性的, 竖直臂将有  $\pm e$  倍的形变, 由此带来的  $\Delta\tau$  的修正在观点 A 和 B 下分别为  $\pm 2e l$  及  $\pm [2e l + (2m e l / r_0)]$ 。这一效应同广义相对论效应可能是难以区别的, 但它在“向上”和“向下”取平均时为零。

## 参 考 文 献

- 1 周培源. 中国科学, 1982, A4: 334
- 2 Zhou Peiyuan. Proceedings of the Third Marcel Grassmann Meeting on General Relativity, 1983, 1
- 3 周培源. 亚太物理讨论会上的报告, 新加坡, 1983
- 4 Zhou Peiyuan. in "International Symposium on Experimental Gravitational Physics, Guangzhou, China, 1987", edited by P F Michelson *et al.* World Scientific, Singapore, New Jersey, Hong Kong, 1988, 110
- 5 Li Yongqui *et al.* in "International Symposium on Experimental Gravitational Physics, Guangzhou, China, 1987", edited by P F Michelson *et al.* World Scientific, Singapore, New Jersey, Hong Kong, 1988, 416
- 6 崔世治. 物理学报, 38: 1882
- 7 张元仲. 物理学报, 1982, 31: 1440

## Interferometer Experiment under Harmonic Condition

Cui Shizhi\* Yu Zhaoxian

**Abstract** Zhou peiyuan's suggestion on Einstein's general relativity is discussed. A "radar echo" experiment is examined and the difference between Zhou's viewpoints and conventional ones is studied.

**Keywords** general relativity, interferometer experiment

\* Department of Physics, Zhongshan University