

旋转物体的等效原理及其空间实验

张元仲[†]

(中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

摘要 文章回溯了等效原理的历史,解释了弱等效原理(伽利略等效原理)、强等效原理(爱因斯坦等效原理)和甚强等效原理.实验检验表明,到 10^{-13} 的实验精度时,没有观测到等效原理的破坏.文章最后,也是文章的主要目的,阐述了广义相对论的不足,即不能描写物质的自旋与引力场的耦合.自旋粒子或自转物体的能-动张量既有对称分量,也有非对称的分量,还有自旋张量.但是广义相对论的引力场方程中只包含了能-动张量对称分量,不包含反对称分量,更没有自旋张量的贡献.涉及自旋与引力场耦合的理论是(有挠率场的)引力规范理论,该理论预言:自旋粒子或旋转物体将偏离测地运动,因而破坏等效原理.为了检验这种破坏,文章作者及其合作者建议进行地面实验和空间实验.

关键词 等效原理,引力规范理论,自旋物质的引力耦合

Equivalence principle for a rotating body and its test in space

ZHANG Yuan-Zhong[†]

(Institute of Theoretic Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The history of the equivalence principle(EP) is reviewed, and the weak EP(Galileo's EP), strong EP(Einstein's EP), and very strong EP are explained. Experiments show that EP has not been violated up to an experimental accuracy of 10^{-13} . In the last part of the paper we point out the insufficiency of general relativity, which cannot describe the coupling between the spin of matter and the gravitational field. As we know, a spin particle or a rotating body can be characterized by an asymmetric energy - momentum tensor and a spin tensor. However, the gravitational field equations in general relativity only involve the symmetric components but not the asymmetric part of the former tensor, nor are there any contributions from the latter tensor. On the other hand, a gauge theory(with torsion) of gravitation does include the coupling of spin with the gravitation field. The theory predicts that the motion for a spin particle or a rotating body would deviate from a geodesic one, and hence violate EP. In order to test this violation we suggest experiments in both a laboratory on the Earth and a satellite in space.

Keywords equivalence principle, gauge theory of gravitation, coupling of spin matter and gravitational field

等效原理是物理学中的基本原理之一,长期以来物理学家们不断地在用实验进行检验.本文主要指出,旋转物体等效原理的空间实验在原理上不同于通常的弱等效原理及其实验检验(见图1).为了清楚地显示这种差别,我们使用伽利略自由落体型的示意图(图1和图2)进行阐述.

1 通常的等效原理的陈述

通常的等效原理分为弱等效原理和强等效原理(甚至还有甚强等效原理).弱等效原理就是伽利略等效原理,强等效原理是爱因斯坦对弱等效原理的

推广,所以又称为爱因斯坦等效原理.爱因斯坦广义相对论的基本假设之一不是弱等效原理而是强等效原理(它已经包含了弱等效原理).

弱等效原理可以这样进行陈述:在地球表面(即地面)之上的同样高度的真空管中,让二个不同物体(材料或重量不同)同时自由下落,在忽略管子中的残余空气的阻力并忽略地球表面弯曲的情况下,这两个做自由落体的物体将会同时落地.

如果使用牛顿力学第二定律和牛顿万有引力定

2008-07-31 收到

[†] Email: zyz@itp.ac.cn

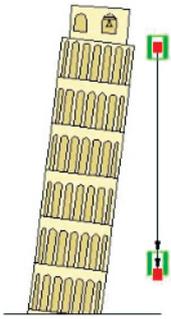


图1 不同材料制成的非旋转物体自由落体实验示意图(绿色和红色代表不同材料,引自 <http://einstein.stanford.edu/STEP/>)

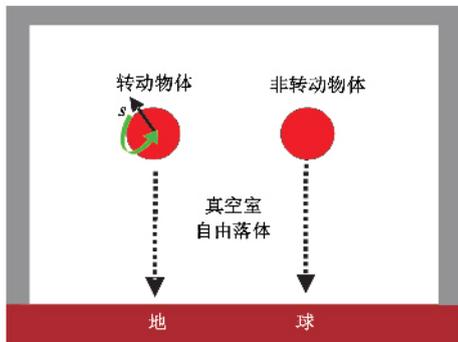


图2 同样材料制成的旋转物体与非旋转物体在引力场中的自由落体

律来描写这两个不同物体的自由落体运动的话,那么弱等效原理又可以说成是“物体的惯性质量与引力质量之比是个与物体的材料、重量等具体物理性质无关的常数”,适当选取质量的单位,则可以更简练地把弱等效原理说成“物体的惯性质量等于引力质量”。

等效原理在现代物理学中之所以非常重要,是因为爱因斯坦在1916年建立了广义相对论。这个理论基于(强)等效原理和广义协变原理。如上所述,强等效原理又称为爱因斯坦等效原理,它是对弱等效原理的一种推广^[1-3]:在引力场中的任何位置 and 任何时间都能找到一个“局部惯性系(爱因斯坦比喻为自由下落的电梯)”,在其中一切物理定律与没有引力场时的惯性系中的形式相同。这里说的局部惯性系就是在引力场中自由下落的“局部实验室”,“局部”指的是在其中进行实验的时间和空间内引力场的不均匀性可以忽略不计(即测量仪器由于不够精确而测量不出可能具有的微小引力势梯度)。

甚强等效原理在强等效原理的基础上把引力相互作用也包含在其中,即引力也不会造成等效原理的破坏。这可以在弱等效原理的描写中得到理解

(见下面有关检验引力自能对等效原理的可能破坏)。

2 通常的等效原理的实验检验

回溯弱等效原理的实验必然会想到意大利的比萨斜塔和伟大的天文学家伽利略。据传说,伽利略在比萨斜塔演示过等效原理实验。但是并没有科学文献记载,只能见于他学生后来的追述。在纪念相对论100周年的世界物理年2005年《旅游卫视》的一个栏目组到内蒙古的一座类似于比萨斜塔高度(54.5m)的铁塔(高为52m)上演了自由落体实验,所用的两个铁球的重量(5kg和0.5kg)相差十倍。但是实验显示,两个金属球落地的时间相差很大。原因有三个,一是两球质心的初始高度不同;二是同时释放的时间有差别;三是空气对两球阻力的差别很大。这说明在日常环境下由于存在空气阻力而做这样的实验是不适合的。因此伽利略不可能在比萨斜塔真做过实验。

文献记载中第一个进行实验的是牛顿,他洞察到可能破坏等效原理的内在因素有两种:物体的重量和物体的材料。引力与材料无关的性质是其他类型的力所没有的。牛顿用单摆进行了实验:两个11英尺(1英尺(ft)=3.048×10⁻¹m)长的单摆其末端各有一个木盒,其中一个木盒相继放入金、银、铅、玻璃、木头等,然后使这两个单摆同时开始摆动,结果表明,在千分之一的精度上,没有观测到摆动周期的不同,即单摆的运动与材料无关。

(弱)等效原理有多种表述。物体在地球引力场中自由落体时,受到牛顿引力 $F = Gm_g M_{\oplus} / r^2$ 的作用,其中 m_g 和 M_{\oplus} 分别是该物体和地球的引力质量(为了简单,这里不区分主动引力质量和被动引力质量), G 是牛顿引力常数。另一方面,物体自由落体的运动由牛顿力学第二定律给出: $F = m_i a$ (m_i 称为惯性质量);由此得到

$$a = (m_g / m_i)g, \quad (1)$$

其中 $g = GM_{\oplus} / r^2$ 是地球引力场在该物体处的引力加速度。这就是说,在引力的作用下,一个物体的加速度正比于引力加速度,比例系数是它的引力质量与它的惯性质量之比,等效原理是说,这个比值是一个不依赖于物体的任何物理性质和构造的普适常数,所以我们会下面互为等价的不同表述:第一,可以适当选取质量和重量的单位,使得普适常数成为1,所以我们可以把弱等效原理说成是“惯性质量

等于引力质量”；第二，一切物体，无论它们的重量和材料如何，在给定的外部引力场中，都具有相同的自由落体加速度；第三，对(1)式求解可以得到检验物体在外部引力场中的运动轨迹，所以弱等效原理可以更为严格地表述成：只要给定初始位置和初始速度，那么一个检验物体在外部引力场中的运动轨迹就与它的重量和材料无关。

狭义相对论的质量-能量关系式 $E = m_i c^2$ (m_i 是惯性质量， c 是真空光速， E 是能量)，表明任何类型的能量都有其相应的惯性质量。具体地说，物体由分子、原子组成，原子由原子核和电子组成，原子核由中子和质子组成，中子和质子又由夸克组成，等等。不同层次的结构具有不同的势能。这就是说，物体的能量 E 和相应的惯性质量 m_i 与其内能有关，也就是与材料有关。一定的惯性质量 m_i 又相应地有一定的引力质量 m_g 。因此，一般说来(1)式中的比例系数 m_g/m_i 可能会因物体材料的不同而不同，即不同的材料在外部引力场中可能会受到不同的新型作用力。因此，寻找等效原理的可能破坏也就是寻找新类型作用力，其重要的科学意义不言而喻。

检验弱等效原理的实验通常是测量两个不同材料的物体在引力场中的加速度的相对变化率 η ，即两物体的加速度之差 ($a_1 - a_2$) 除以两物体的平均加速度 ($(a_1 + a_2)/2$)，由(1)式可以推出：

$$\eta = \frac{(a_1 - a_2)}{(a_1 + a_2)/2} = 2 \frac{(m_g/m_i)_1 - (m_g/m_i)_2}{(m_g/m_i)_1 + (m_g/m_i)_2}$$

不同精度的实验都没有测量到等效原理的破坏^[2]，其中最高精度 10^{-13} 的实验是用转动扭称获得的^[4] (见表1)。

表1 检验弱等效原理的实验

实验者	精度	实验方法
Philippus, 500 (?)	低	自由落体
伽利略, 1590 (?)	10^{-2}	自由落体
牛顿, 1686	10^{-3}	摆
Bessel, 1832	10^{-5}	摆
Eotvos, 1922	10^{-8}	扭称
Potter, 1923	10^{-6}	摆
Dicke 等, 1964	10^{-11}	扭称
Braginskii, Panov, 1972	10^{-12}	扭称
Keiser & Faller, 1981	10^{-10}	流体支撑
Niebauer 等, 1987	10^{-10}	自由落体
Adelberger 1990	10^{-12}	扭称
S. Schlamminger 等, 2008	10^{-13}	转动扭称

在空间卫星上进行更高精度的实验已经计划和筹备了多年，其中法国的小型卫星(MicroScope)计划于2010年发射，拟在 10^{-15} 精度上检验等效原理^[5]。

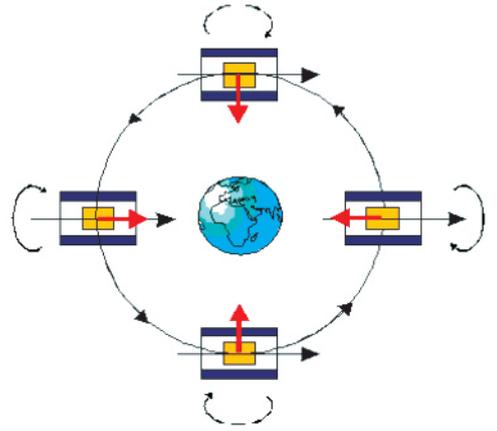


图3 MicroScope 小型卫星原理示意图

上述实验所用物体都是宏观物体，引力自相互作用太小。要想检验引力自能对等效原理的可能破坏，需要用天体：如果引力自能造成等效原理的破坏，那么地球和月球在太阳引力场中的自由落体加速度会不同，月球绕地球运动的轨道就要有畸变(文献中把引力自能的可能影响归并到了甚强等效原理)。这种用天体系统检验等效原理的设想最早是牛顿提出来的，后来(1825年)拉普拉斯研究的“地-月”系统最适合于用来做这种检验，他得到 $\eta < 2.9 \times 10^{-7}$ ；最近，利用30年来地-月距离的激光测量数据所获得的结论是^[6]： $\eta < 10^{-13}$ 。

爱因斯坦(强)等效原理的实验检验可以分为3种类型^[2]：弱等效原理的检验(如上所述)、局部洛伦兹不变性的检验、局部位置不变性的检验。强等效原理之所以一定包含弱等效原理，是因为自由下落的电梯，无论它是用何种材料建造的，都必须具有相同的自由落体加速度，才能被看作是“局部惯性系”。第二类是验证“局部惯性系”中狭义相对论的正确性。第三类包括引力红移实验和非引力的基本常数的普适性测量：精确的引力红移实验大多是在上世纪六七十年代做的，结果都与广义相对论预言符合；非引力的基本常数包括精细结构常数、弱相互作用常数、强相互作用常数、电子-质子的质量比等，其数值可能与时间有关的猜测起源于狄拉克。观测这种可能的变化要在宇宙的时间尺度进行，最近有报道说，精细结构常数在宇宙早期的数值比今天的数值略小，这一新结果对等效原理有何影响还有待进一步研究。近年来，空间中的极高精度冷原子钟技术的发展为上述第三类的空间实验带来了希望。

上面的实验使用的都是宏观物体。自然的问题是：微观粒子是否满足等效原理？由于微观粒子

(在低速情况下)需要用量子力学来描写,这会面临一些概念性问题.从20世纪60年代以来,人们就在理论和实验两个方面对微观粒子在引力场中的自由落体运动进行了许多研究.实验相当困难,精度也较低.1976年,中子自由落体实验的精度只有 $\eta \leq 3 \times 10^{-4}$.近年来,冷原子干涉仪技术为极高精度的实验提供了基础^[7,8],预计精度高达 10^{-15} ,甚至 10^{-17} .另外,微观粒子的自旋与地球引力场(地球自转)的耦合可能对等效原理的影响也在理论上开始了研究^[9].

3 物体的自旋对等效原理的可能破坏

既然微观粒子的自旋可以与引力场耦合,那么宏观物体的转动同样有可能与引力场相互作用.如图2所示,如果旋转物体与非旋转物体在地球引力场中受到的引力不同,那么旋转物体与引力场的耦合可能有三种效应存在:

第一,旋转物体受到一个力矩的作用,使其自旋轴的指向在自由落体过程中发生改变,这称为自旋方向围绕一个固定方向的进动.这种效应存在于爱因斯坦广义相对论的预言之中(当然,这种效应与等效原理无关).广义相对论预言了两种类型的这种进动:一是由于地球周围的空间弯曲造成的进动;另一个是所谓的“参考系的拖曳”效应(是1918年Lense和Thirring首先用广义相对论方程计算获得的).到20世纪50年代,为了用陀螺检验这类效应而提出了GP-B(Gravity Probe-B)的引力卫星探测器计划.1964年,美国国家航空航天局开始资助这项计划.40年之后的2004年10月24日,这颗实验卫星发射升空.迄今为止,实验数据仍在分析之中.

第二,旋转物体受到的力矩作用,使其自转速率发生改变.这种效应还没有相应的理论给出过预言.

第三,旋转物体的质心受到一个附加的引力作用,使其质心自由落体的加速度不同于非旋转物体,因而图2中的两个球体不会同时落地,在这种意义上说,旋转物体破坏了等效原理.广义相对论没有给出这类预言.

这类预言出现在超越爱因斯坦广义相对论的引力规范理论(或者称为Einstein-Cardan型理论)之中.之所以要超越爱因斯坦,是因为广义相对论对于描写自旋粒子或自旋物体(或流体)有不足之处.描写一个自旋粒子或宏观自旋物体的物理量除了能量-动量张量之外,还要有与自旋有关的量即自旋张

量.自旋张量也提供自旋粒子或自旋物体的能量,因而也应当对引力有贡献;但是广义相对论中没有包含这种贡献,这是其一;其二就是自旋粒子或自旋物体的能量-动量张量既有对称部分也有反对称部分,但是广义相对论中引力场的源只纳入了这里说的对称部分,而反对称部分对引力场没有贡献.引力规范理论通过引入一种新的传递引力相互作用的挠率场(torsion)把上述两种贡献包含了进去:自旋张量成为挠率场的源,能量-动量张量的反对称部分影响着挠率场的动力学.在这样的理论中,自旋粒子或旋转物体质心的运动将偏离测地运动,因而破坏等效原理(在此引用1973年我们文章中的结论^[11]:在这样的理论中,“通常意义下的等效原理严格说来不再成立.这是因为,第一,有挠率时,作为引力势的联络在局部总是变不掉的,第二,自旋不同的粒子在引力场中的运动也不同.不过这种效应一般是很小的^[12],因而可以预期对等效原理的偏离一般也很小”).

使用引力规范理论计算一个有一定尺度的旋转物体的这类效应是非常复杂而困难的事情.为了量级上的估计,我们使用了与模型无关的唯象分析方法对旋转物体与地球引力场的相互作用进行了估算.结果表明^[13],在地球表面,一个现实尺度的旋转物体破坏等效原理的相对量级上限是 10^{-14} ,进而提出了地面和空间的实验检验计划.在地面实验室,已经使用两个真空管进行了这类实验的观测:在一个真空管中,自由落体的陀螺高速旋转,另一个真空管中的自由落体陀螺没有旋转.结果表明,在 10^{-7} 的精度内,等效原理成立^[13].由于机械陀螺的摩擦力难于克服,高精度的实验需要在空间卫星上使用陀螺-加速度计进行,有关的空间实验还处于规划之中.

参考文献

- [1] 爱因斯坦. 广义相对论基础. 见: 爱因斯坦论著选编. 上海: 上海人民出版社, 1973. 36
- [2] Will C M. Theory and experiment in gravitational physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1993
- [3] 温伯格著, 邹振隆等译. 引力论和宇宙论: 广义相对论的原理和应用. 北京: 科学出版社, 1980
- [4] Schlamming S, Choi K-Y, Wagner T A et al. Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 041101
- [5] <http://microscope.onera.fr/mission.html>
- [6] Williams J G et al. Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 261101
- [7] Fray S, Diez C A, Hansch T W et al. Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 240404
- [8] Dimopoulos S, Graham P W, Hogan J M et al. Phys. Rev.

Lett. ,2007 ,98 :111102

[9] Silenko A J , Teryaev O V. Phys. Rev. D ,2007 ,76 :061101

[10] <http://einstein.stanford.edu/>

[11] 郭汉英 , 吴咏时 , 张元仲. 科学通报 ,1973 ,18 :72[Guo H Y , Wu Y S , Zhang Y Z. Chin. Sci. Bull. ,1973 ,18 :72(in Chinese)]

[12] Kibble T W B. J. Math. Phys. ,1961 2 :212

[13] Zhang Y Z , Luo J , Xie Y X. Modern Phys. Lett. A ,2001 ,12 :789 ; Luo J , Nie Y X , Zhang Y Z *et al.* Phys. Rev. D ,2002 ,65 :042005 ; Zhou Z B , Luo J , Yan Q *et al.* Phys. Rev. D ,2002 66 :022002

北京欧普特科技有限公司

光学元件库—欧普特科技

欢迎访问:

www.goldway.com.cn

北京欧普特科技有限公司严格参照国际通常规格及技术指标, 备有完整系列的精密光学零部件(备有产品样本供参考) 供国内各大专院校、科研机构、试验室随时选用, 我公司同时可为您的应用提供技术咨询。我公司可以提供美国及欧洲产的优质红外光学材料, 如硒化锌, 硫化锌, 多光谱硫化锌等。



- 光学透镜: 平凸、双凸、平凹、双凹、消色差胶合透镜等。
- 光学棱镜: 各种规格直角棱镜, 及其他常用棱镜。
- 光学反射镜: 各种尺寸规格的镀铝、镀银、镀金, 及介质反射镜。直径 5mm—200mm。
- 光学窗口: 各种尺寸规格, 材料的光学平面窗口, 平晶。直径 5mm—200mm。
- 各种有色玻璃滤光片: 规格为直径 5mm—200mm。(紫外、可见、红外) 及窄带干涉滤片。
- 紫外石英光纤: 进口紫外石英光纤, SMA 接口光纤探头, 紫外石英聚焦探头。

地址: 北京市海淀区知春路 49 号希格玛大厦 B 座#306 室

电话: 010-88096218/88096217 传真: 010-88096216 网址: www.goldway.com.cn

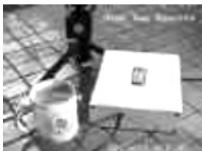
联系人: 陈镛先生, 施楠小姐, 曾安小姐

E-mail: kevinchen@goldway.com.cn, shinan@goldway.com.cn, zengan@goldway.com.cn

独家代理销售加拿大 GENTEC-EO 生产的激光功率能量计及光束分析仪, 其产品具有功率、能量探测头规格全, 宽光谱响应, 探头损伤阈值高、灵敏度高, SOLO 显示器自动识别每个探头, 带有自动校准功能; 光束分析仪定量、定性分析激光束等特点。



独家代理销售美国 STELLARNET 生产的微型光纤光谱仪, 其产品具有多种型号规格可选, 坚固耐用、轻巧便携, 波长范围覆盖 190—2200nm, 适合于实验室、现场及野外的光谱测量。

联系人: 栗曼珊 sumanshan@goldway.com.cn 联系电话: 010-84562860 84562550 传真: 010-84569901北京欧普特科技有限公司 <http://www.goldway.com.cn>

北京朝阳区酒仙桥东路一号, M7 栋东五层, 100016