

等效原理的实验检验

中国科学院理论物理研究所

张元仲

提起意大利的比萨斜塔人们就一定会想到伟大天文学家伽利略和他的比萨斜塔实验。伽利略在比萨斜塔所做的自由落体观测向人们展示了他已经发现的物理学的一个基本定律——(弱)等效原理:从塔顶同时自由下落的两个重量相差悬殊的金属物体同时到达地面(由于金属物体较重,空气的阻力可以忽略不计)。

后来,牛顿洞察到自由落体运动等效性的内在含义。可能破坏这种等效性的内在因素有两种,一种是物体的重量(它表征物质的多少和惯性的大小),另一种是物体的材料(成分)。由不同材料(例如,熟铁、铝、石墨、石头等)构成的物体在磁场中会有不同的加速度,可是它们在引力场中则有完全相同的加速度。引力与材料无关的性质是其他类型的力所没有的。为了检验这种特性,牛顿用单摆进行了实验:两个11英尺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、食盐、木头、水以及小麦;使这两个单摆同时开始摆动,观测它们的摆动周期有什么差别。结果,在千分之一的精度上没有观测到不同;这就是说,单摆的运动与材料无关。这是第一个精密的、有文献记载的弱等效原理实验。

借助于顿力学第二定律和万有引力定律,弱等效原理可以有多种表述。按照牛顿力学第二定律,任何物体在给定外力 F 的作用下其加速度 a 与外力成正比,比例系数 m_i 称为惯性质量;写成公式是: $F = m_i a$;如果这个外力是引力,那么牛顿万有引力定律给出这个外力是 $F = m_g g$,其中 m_g 是该物体的引力质量(引力质量又分为主动引力质量和被动引力质量,“主动”是指“产生”引力,“被动”则是“感受”引力;为了简单我们将假定两者相等), g 是外部引力场在该物体处的引力加速度(为了简单,我们没用矢量符号,也没有写出引力加速度的具体表达式);由此得到:

$$a = \left(\frac{m_g}{m_i} \right) g \quad (1)$$

这就是说,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,如果这个比值是一个不依赖于物体的任何物理性质的普通常数,那么就会有下面这样一些互为等价的结论(也就是弱等效原理的互为等价的不同表述):(a)惯性质量与引力质量之比是个普通常数;我们可以适当地选取质量和重量的单位使得普通常数成为一,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”;(b)在固定质量单位和重量单位的情况下,公式(1)意味着“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”；(c)对方程(1)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，那么一个不带电的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。

狭义相对论的一个非常重要的结果就是(惯性)质量-能量关系式(它是原子弹、氢弹、以及核能的理论基础)： $E = m_i c^2$ ；或者写成： $m_i = E/c^2$ ，其中 m_i 是惯性质量， c 是真空光速， E 可以是物体的内能、动能、总能量等；总之，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。如果涉及到分子(或原子)的层次，那么物体的固有能量就包含自由分子(或原子)的固有能量和它们之间的相互作用势能。不同的层次具有不同类型的相互作用力(电子和原子核之间是电磁力；中子和质子之间是强力；等等)，不同的力给出不同的势能。这就是说，物体的总能量 E (也就是惯性质量 m_i)与其内能(或材料)有关。一定的惯性质量 m_i 又相应地有(但并非相等)一定的引力质量 m_g 。因此，一般说来公式(1)中的比例系数 m_g/m_i 可能会因物体材料的不同而不同；于是，具有不同材料的物体在外部引力外场中可能会有不同的加速度。换句话说，不同的材料在外部引力场中可能会受到不同的作用力；这种力可能包含除了引力、电磁力、弱力、强力这四种已知的基本相互作用(力)之外的第五种(基本相互作用)力或其它形式的(非基本相互作用的)新力。因此，寻找等效原理的可能破坏也就是寻找新类型的作用力，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 $(a_1 + a_2)/2$ ，用公式表示就是：

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

其中用到了公式(1)。依据实验装置的不同可以把弱等效原理实验分成三个类型：(伽利略型的)自由落体实验、(牛顿型的)单摆实验、(厄阜型的)扭称(或扭摆)实验；在这类实验中最值得一提的是厄阜(Eotvos)实验：在一个扭称横杆(在横杆的中点用一根扭丝将其悬挂起来)的两端挂上不同材料的物体，对这两个物体受力情况的分析可知，它们受到指向地心的引力和地球自传产生的惯性力，如果公式(1)中的引力质量与惯性质量不等，那么这两个力的水平分量会形成一个力矩而使横杆水平转动，最后被悬丝的反方向力矩平衡。在横杆的取向转动180度因而两个不同材料的物体互换位置后，引力和惯性力的水平分量所形成的力矩就会改变，使得扭称相对于支架偏转一个角度。厄阜在用不同材料反复进行的观测中在 5×10^{-9} 的相对精度内没有出现这种偏转，用公式表示就是 $\eta \leq 5 \times 10^{-9}$ 。后来，1964年 Dicke 等人、1972年 Braginsky 和 Panov 分别使用类似的装置和改进的技术重复了这种实验，在 10^{-11} 和 10^{-12} 的精度上仍未观测到弱等效原理的破坏(这两个实验与厄阜的差别在于观测的

是物体相对于太阳而不是相对于地球的引力加速度)；这是迄今为止公认的精度最高的弱等效原理实验。1994年进行的类似实验其精度没有大的改善，仍只有 10^{-12} 的量级。

在上面这些实验中，所用物体都是实验室中的宏观物体，其中引力相互作用的自能太小；因而它们检验的是除引力以外的其他相互作用势能对等效原理的可能影响。要想检验引力自能对等效原理的可能破坏需要用天体的运动：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，因而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： $\eta < 10^{-13}$ ，即在 10^{-13} 的精度上未发现等效原理的破坏。

1986年，E. Fischbach 和 S.H. Aronson 猜测在不同材料之间可能存在力程大约为200米的第五种力（因而等效原理不再成立）。他们主要依据下面两件事：牛顿引力常数G的实验测定值的不一致性和对厄阜实验数据的重新分析。他们的这篇文章一发表就引起了广泛的（特别是实验物理学家的）关注，在不到三年的时间里许多物理学家使用了多种不同的方式完成了众多的实验观测，但是均未发现第五种力存在的迹象。1990年之后就很少有人继续进行这类实验研究了。

等效原理在现代物理学中之所以非常重要也是因为爱因斯坦的广义相对论。1905年爱因斯坦提出了崭新的（平直）时空理论即狭义相对论，并把牛顿力学第二定律写成了符合狭义相对性原理的形式，进而圆满解释了牛顿力学难以解释的运动物体的某些电磁学现象。狭义相对论的成功促使爱因斯坦进一步考虑如何修改牛顿万有引力定律使之满足狭义相对性原理。之所以需要修改这个定律是因为它虽然能够解释观测到的水星近日点进动值的绝大部分，但是还剩下小部分不能解释。由于在平直时空中不可能把牛顿引力定律修改成满足狭义相对性原理的形式，爱因斯坦提出了一种弯曲时空的度规理论，即广义相对论。这个理论基于两个假设：等效原理和广义协变原理。这里的等效原理是指强等效原理或称为爱因斯坦等效原理，它是爱因斯坦对弱等效原理的一种推广（强等效原理自然包含了弱等效原理）：在引力场中的任何位置都能找到一个“局部惯性系”，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。我们应当这样理解“局部惯性系”：考虑一个处于空间分布不均匀且随时间变化的引力场中的电梯，“局部”就是指在这个电梯中在进行实验的时间内引力场的不均匀性可以忽略不计；至于多么小的电梯算做“局部”要看测量仪器的灵敏度，具体地说就是电梯的尺度要小到使仪器测量不出引力场的不均匀性；这样一个电梯在引力场中自由下落时如同一个在无引力场的真空中做惯性运动的惯性系（引力在“局部”被惯性力完全抵消了），因此在其中所有物理定律都取狭义相对论的形式。

爱因斯坦（强）等效原理的实验检验可以分为3种类型：弱等效原理的检验、局部罗伦兹不变性的检验、局部位置不变性的检验。首先，爱因斯坦等效原理之所以一定包含弱等效

原理是因为上面提到的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落体加速度才能被看做是“局部惯性系”。第二种类型的实验实际上是验证在“局部惯性系”中狭义相对论的正确性：如果地球自身引力场和自转的影响可以忽略的话，那么它就可以被看成是在太阳引力场中的自由落体，因而在地球上的实验室内所做的许多实验例如寻找绝对参考系和检验相对性原理的实验也都是对爱因斯坦等效原理的一种检验。第三类实验包括引力红移实验和非引力的基本常数的普适性测量：引力红移是指光波从引力势强的地方向弱的地方传播时其频率会变低（波长变长，即颜色向红端变化；当然，反方向观测就会是兰移），例如太阳比地球的引力势强，所以在地球上观测到的太阳谱线会向红端移动，这是检验在局部所做实验的结果与空间位置的无关性，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喇克。观测这种可能的变化要在宇宙的时间尺度进行，例如比较遥远星系或类星体的光谱线与太阳系中的同位素丰度。以前的观测分析都没有发现这些常数在宇宙的演化过程中有什么变化；但是，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。

上面介绍的各种不同类型的实验都是使用宏观物体来对等效原理进行检验的；人们自然会提出这样的问题：微观粒子在引力场中的运动是否满足等效原理？由于微观粒子（在低速情况下）需要用量子力学而不是用牛顿力学来描写，所以使用它们来做自由落体实验就会面临一些概念性的问题。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。用单个原子或基本粒子进行实验相当困难，精度也较低。1976 年完成的中子自由落体实验其精度只有 $\eta \leq 3 \times 10^{-4}$ ；更高精度的实验正在进行之中。

由于各种现代的大统一理论都包含新的相互作用力，其大小与材料有关，因而会破坏等效原理。为了寻找这种新力，国际上有不少大型的实验计划，其中花费最多、精度最高、合作最广泛的当属“等效原理卫星检验”(STEP)计划，可以探测到方程(2)定义的 η 值为 10^{-18} 。这个研究项目以美国为主西欧国家合作，其预研小组和实验室设在美国加州的斯坦福大学，预计几年之内将把实验装置送上卫星轨道。作为地面研究项目，德国布莱梅大学的“应用空间技术及微重力中心”将类似的装置在 110 米的落塔上做自由落体实验，精度好于 10^{-12} 。

最后介绍一下我们最近完成的一项研究。上述自由落体实验中所用的宏观物体都没有转动。最近，我们的一个研究项目（中国科学院理论物理所主持，华中科技大学和中国科学院物理所合作，实验在华中科技大学引力实验中心进行；该项目属于中国科学院力学所国家微重力实验室主持的科技部攀 A 预选项目的一个子课题）对宏观物体的自转与地球引力场之间可能存在的相互作用在理论和实验两个方面进行了研究；实验装置是两个十米高的真空管，其中顶端各悬挂一个陀螺（一个高速转动、另一个不转），实验中让它们（几乎）同时自由下

落，用激光干涉的技术观测两陀螺相对位置在下落过程中的可能变化；测量结果显示：在 10^{-7} 的精度内没有观测到等效原理的破坏。