

现代引力理论概论

靳锐敏 著

河南科学技术出版社

前 言

本书建立在这样的信念上：客观世界是可以认识的，人们的认识总是不断向前发展、不断深化的。只存在尚未被认识的物质及规律，不存在永远也无法认识的物质和规律。如果一个理论导致这样的结论：存在一种我们永远也认识不了的物质及规律，那么它必定是错误的，不是一个科学的理论，我们不应该满足这样的理论。物理学史告诉我们，物理学的每一步基础性的发展都与引力理论的发展有着紧密的联系。物理理论体系的产生和发展，都是与引力理论的认识和发展分不开的。引力可能是我们认识的最古老、最普遍的一种力，它涉及空时的概念。本书就是从这一角度展开的。

本书共分七章：

- 第一章 牛顿的引力理论
- 第二章 爱因斯坦的引力理论
- 第三章 引力理论的发展
- 第四章 引力与电磁理论
- 第五章 再论空间和时间
- 第六章 引力理论概论
- 第七章 引力理论预言

其中，第一、二章是简单的介绍。第一章主要介绍牛顿以前对引力现象的认识，牛顿的引力定理的成功和不足地方，第二章主要介绍爱因斯坦广义相对引力理论的主要思想和主要结

论。第三、四、五、六章是重点写的。第三章对牛顿和爱因斯坦理论进行了分析,主要对引力现象从新的角度进行分析,提出变引力场与动引力场的概念,并对广义相对论引力理论所能解释的引力红移,水星近日点进动,光线在太阳附近偏折,雷达波的时间延迟以新的解释。第四章讨论了动引力场的规律并与电磁理论作一对比。它们有类似的数学描述模型。第五章对空间和时间进行了重新讨论,把物体速度的地位提高到物质的客观属性的高度。并提出阶段论的思想。第六章主要是对引力理论提出两个预言,一个是雷达波时间延迟与广义相对论有微小差别的结果;一个是引力场量子化。

清楚的物理图像是物理上最基本的要求。本书着重阐述清晰的物理图像,为了使专业人员满意,还加上了数学描述,当然,非专业人员不看其数学描述并不影响对物理思想的理解。

在写书的过程中,力求体现这样一个特点:简洁。当然,简洁并不是浅薄,深奥并不等于符号的繁琐难懂。本书不作具体细致的描述,因为这会使内行看起来罗嗦,并且毫无疑问将占去大量的篇幅,使主线不明,对具体细节有兴趣的读者,可进一步阅读有关的资料。本书并未注出全部参考文献,因为这些内容已属经典,并载入了教课书。我们试图用简洁的形式反映客观的道理,这个目的是否达到及达到的程度怎样,必须等待读者——现在的和未来的——严肃的批评指正。

作者

1993年9月

目 录

第一章 牛顿引力理论	(1)
第一节 对引力现象的早期认识	(1)
第二节 万有引力定律的发现	(3)
第三节 万有引力定律及其推导	(4)
第四节 万有引力定律的成功	(5)
第五节 万有引力定律存在的问题及修改	(8)
第二章 爱因斯坦引力理论	(11)
第一节 狭义相对论	(11)
第二节 广义相对论	(13)
第三章 引力理论的发展	(20)
第一节 新引力理论的几个基本概念	(20)
第二节 变引力场、动引力场的本质和规律	(23)
第三节 用新引力理论解释引力红移等现象	(26)
第四章 引力与电磁理论	(34)
第一节 静中心力场	(35)
第二节 动中心力场	(40)
第三节 引力作用与电磁作用的对比	(44)
第五章 再论空间和时间	(46)
第一节 中国古代关于时间和空间的认识	(46)
第二节 古希腊、罗马的空间和时间观	(48)
第三节 牛顿的时空观	(52)
第四节 贝克莱、休谟、康德的 唯心主义时空观	(56)

第五节	迈布尼兹、黑格尔、 路·费尔巴哈及马赫的时空观	(57)
第六节	爱因斯坦的时空观	(59)
第七节	牛顿与爱因斯坦时空观的对比	(61)
第八节	空间和时间再讨论	(63)
第九节	关于阶段论与对空间认识的阶段性	(66)
第十节	空间的无限性	(72)
第六章	引力理论概论	(74)
第一节	物理学研究的对象和目的	(74)
第二节	物理学发展的模式	(76)
第三节	判断理论正确与否的依据	(79)
第四节	物理与数学	(82)
第五节	概念在物理学中的特殊意义	(84)
第六节	物理学理论的发展	(85)
第七节	引力理论概论	(89)
第七章	引力理论预言	(91)
第一节	关于雷达波时间延迟的预言	(91)
第二节	关于引力场量子化可能性的探讨	(93)

第一章 牛顿引力理论

第一节 对引力现象的早期认识

一、关于早期经验

人们很早有这样的经验：跳起的人总是要落地的，抛起的物体也是要下落的……地球附近的一切物体总是要向地球回归，并且不同的物体有不同的下落情况，重的物体下落的快，轻的物体下落的慢。人们渐渐认识到这与媒质有关，致密的水和稀疏的空气对不同物体的阻滞是不同的。由于下落物体受周围物质（称为媒介物）的阻滞，下落物体的速度应当变小，这样的结论是直观经验的总结。理论不能只是一些直观经验的罗列，必须通过这些表面现象看到本质的东西。人们于是提出这样的问题：如果没有媒质存在，情况会怎样呢？

提出这样的问题，是一个不单靠直观经验而需用理论来回答的问题。而理论的建立需要实验和逻辑推理，这使人们从单纯经验进入了实验阶段。

二、落体运动规律

使两个重量不同的球同时从高处落下。结果，轻重不同的两个球从同一高度下落，达到地面的时间几乎是相同的，并且速度的变化是均匀的。这实验表明了重力作用下物体运动的规律。自由落体运动规律为：

$$S = gt^2/2$$

其中 s 为物体下落的距离, g 为重力加速度, t 为下落时间。

三、单摆

一个很轻的长线下端系一个小重球就是一个简单摆。这是一个只有线的拉力和重力作用下的物体的运动,当线的长度(L)相同时,在同一地方,球的摆动,每来回一次用的时间(T)相同,并且这个时间与线的长度有关,这一关系由实验总结出为:

$$T = 2\pi \sqrt{L/g}$$

在重力作用下的运动还有平抛等。它们都表明,物体在重力作用下的运动是有规律的,地球产生的重力作用是有规律的。

四、天体运动规律

经过长期的艰苦的观测,积累数据,总结规律,人们发现下面的天体运动规律:地球、水星、金星、火星、木星、土星、天王星、海王星,它们以不同的速度,在不同的轨道上绕太阳运动,符合开普勒定律:

第一,每个行星都沿着椭圆轨道绕太阳运行,太阳位于椭圆的一个焦点上。

第二,行星与太阳的连线在相等的时间内扫过相等的面积。

第三,所有行星的轨道半径(R)的立方与运动周期(T)的平方之比相同。

$$R^3/T^2 = \text{常数}$$

天体的一切运动规律都是受引力作用的具体表现,天体的运动规律再一次表明,万有引力是一种规律性的作用。

第二节 万有引力定律的发现

引力作用下的有规律运动明白无误地表明引力的作用是有规律的。这一强烈的暗示,使好奇心强的人吃惊,进而找出其中的奥妙,这需要一个天才的好奇者来完成这一规律的发现工作,他就是牛顿——世界著名的物理学大师。有人说苹果落到牛顿头上,打出一个万有引力定律,这太玄了,更重要的是万有引力定理发现的条件已经成熟,当然,牛顿的天才使他敏锐地分析到苹果落地是因为受到地球引力作用。下一个问题就是在地球外的物体如月球是否也受同样的作用,这一作用有什么规律。

月球以不变的速度绕地球运动,有一个指向地球的加速度。当时,人们已经知道,月球和地球相距 384000 公里。而绕地球一周需要 27.3 个昼夜(2.34×10^6 秒) 所以月球加速度

$$a = \frac{v^2}{R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2} = 2.7 \times 10^{-3} \text{ 米/秒}^2$$

这个数值小于地球表面的引力加速度 g , 这说明随着距离的增加,引力加速度是变小的,并且发现,这一差别的倍数,正好是月球离地球距离与地球半径的倍数。

$$\frac{a_H}{a_{地}} = \frac{r_{地}}{r_{月地}} = \frac{1}{3600}$$

于是,牛顿大胆推测,物体之间的引力与它们之间距离平方成反比。根据开普勒定律,所有行星运动周期的平方,与其

轨道半径立方之比是一常数,于是牛顿终于得出了引力随距离改变的规律。

不能说万有引力的发现全部归功于牛顿,胡克首先注意到引力与地球上重力有同样的本质,并首先使用“万有引力”这一词语的,另外,英国人哈雷等人也做出了贡献。

第三节 万有引力定律及其推导

一、万有引力定律

两个质量分别为 m 、 M 的物体间存在引力 F ,其大小与其距离 R 的平方成反比,与质量的乘积成正比,方向在其连线上。

$$F = G \cdot \frac{mM}{R^2}$$

G 为万有引力常数。这种相互作用存在于一切有质量的物体之间。

二、万有引力定律的推导

设行星沿轨道作近似圆周运动,其加速度大小为 V^2/R 。受太阳的作用力为 $F = mv^2/R$ 。其中 m 为行星质量, R 为轨道半径。

$$V = 2\pi R/T$$

其中 T 为行星运动的周期。

$$F = (4\pi^2 R)m/T^2$$

根据开普勒定律, $T^2/R^3 = \text{常数}(C)$

$$F = \frac{4\pi^2}{C} \cdot \frac{m}{R^2}$$

再来分析这一作用与太阳质量 M 的关系。太阳与行星的吸引力是相互的,它们大小相等,方向相反,这一作用与行星质量成正比,从行星这一方来看,这一作用必然与太阳质量成正比,于是得出

$$F = G \cdot \frac{Mm}{R^2}$$

卡文·迪许(H·Carvendish 1737—1810)做了两物体万有引力的实验,测出 $G = 6.67 \times 10^{-11}$ 牛顿·米²/千克²。

第四节 万有引力定律的成功

一、自由落体实验结果的解释

从万有引力定律,我们可以看出:若不考虑空气的阻力,所有自由落体运动的加速度相同。

$$g = F/m = Gm'/R^2$$

其中 m 为落体物质的质量, m' 为地球质量,这个结果也就是自由落体的实验结果。

二、海王星的发现

发现万有引力定律以后,人们考虑,如果行星受到扰动,因为太阳质量很大,相对行星间的相互作用是小的扰动,如果把这种扰动考虑在内,就得出行星运动的具体情况。后来,人们对天王星的观察表明,天王星的轨道与万有引力定律计算的结果有偏离。天王星的“越轨”行动使人们困惑不解,人们假定在它周围存在一个行星,因为它的作用,使天王星轨道发生变化。在该理论指导下,果然,在天王星周围,人们兴奋地发

现了海王星,没有比这更能确凿证明牛顿引力理论的成功了。用同样的方法,人们发现了冥王星,还有其它的行星。

牛顿还解释了潮汐现象,这是因为月球和太阳相互吸引的结果。根据万有引力定律,他又成功地解释了地轴的周期为26000年的缓慢进动。

三、摄动理论

所谓摄动,就是太阳周围运动的行星,受太阳引力作用,做椭圆运动的同时,又受到其它行星的作用,使行星偏离原来的轨道,这就是摄动。

彗星的质量远远小于行星质量,彗星受太阳作用运动轨道,当同时受行星作用时发生变化,因为彗星质量小,不能对行星的轨道产生影响。当彗星从某个行星旁边经过时,彗星轨道变成双曲线(开放轨道)。因而,由于与行星的相互作用,彗星有时候就脱离了太阳系。

摄动理论的数学表示是这样的。

设一个质量为 m 的行星受太阳引力作用,假设受到一个很小的微扰,则行星将不再保持原来的圆周运动。在固定的平面内,我们用极坐标系的描述方法,运动方程为:

$$m\left[\frac{d^2r}{dt^2} - r \cdot \left(\frac{d\theta}{dt}\right)^2\right] = F_r \quad (1)$$

$$m\left(\frac{r d^2\theta}{dt^2} + 2 \frac{dr}{dt} \cdot \frac{d\theta}{dt}\right) = F_\theta = 0 \quad (2)$$

用 r 乘(2)式两边得:

$$\frac{d}{dt}(mr^2 \frac{d\theta}{dt}) = 0, \quad mr^2 \frac{d\theta}{dt} = C$$

其中 C 为常数。把上式代入(1)式化简得:

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} - \frac{C^2}{mr^3} = F$$

则
$$m \frac{d^2 r}{dt^2} = F + \frac{C^2}{mr^3} \quad (3)$$

当行星作圆运动时, r 为常数。

$$-\frac{C^2}{ma^3} = F \quad (4)$$

当行星受到太阳外其它行星作用时, 设作用后, 行星矢径 r 可写为:

$$r = a + x$$

其中 x 是一个小量。表示受微扰的情况, 由上式得:

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{d^2 x}{dt^2}$$

则(3)式变为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - \frac{C^2}{m(a+x)^3} = F(a+x)$$

由于 $x \ll a$, 在 $x = 0$ 处展开, 略去高于 x^2 的项。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \left[-\frac{3}{a} F(a) - F'(a) \right] x = 0$$

这是一个简谐振动方程, 周期

$$T = 2\pi/\omega = 2\pi \sqrt{m / \left[3F(a)/a + F'(a) \right]}$$

设 θ 的变化为均匀的, 由(4)式得:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left[-\frac{F(a)}{ma} \right]^{1/2}$$

在一半周期时间内, 行星转过的角度为:

$$\psi = \frac{1}{2} T \cdot \frac{d\theta}{dt} = \pi \left[3 + a \frac{F'(a)}{F(a)} \right]^{-1/2}$$

在太阳系中有一行星, 受到其它行星引力微扰近似为

ε/r^4 , 则

$$\begin{aligned} F(r) &= -\frac{k}{r^2} - \frac{\varepsilon}{r^4} \\ \psi &= \pi \left(3 + a \frac{2ka^{-3} + 4\varepsilon a^{-5}}{-ka^{-3} - \varepsilon a^{-4}} \right)^{-1/2} \\ &= \pi \left(\frac{1 - \varepsilon k^{-1} a^2}{1 + \varepsilon k^{-1} a^{-2}} \right)^{-1/2} \\ &= \pi \left(1 + \frac{\varepsilon}{ka^2} \right) \end{aligned}$$

对最靠近太阳的水星, 计算表明引力微扰引起水星近日点进动为 531 角秒 / 百年, 而实际观测到 574 角秒 / 百年, 也就是说, 牛顿引力理论未能解释这个差异。

第五节 牛顿引力理论存在的问题及修改

一、牛顿引力理论存在的问题

牛顿引力理论获得了巨大的成功, 它的历史地位的确是毫无疑问的。但是, 随着科学的发展, 人们发现水星近日点的进动修正与牛顿引力理论计算结果不符, 光线在太阳附近的偏折也与测量不符。

另外一个问题就是所谓 Neaman — Aeeliger 疑难, 具体就是, 若承认宇宙无限, 则无限的物质产生无限大的引力, 就会把一切物体撕碎, 可事实并不是这样。

再一个问题就是, 牛顿的引力理论强烈地暗示, 引力是一个超距作用, 关于这一点牛顿比以后许多物理学家更明白这

个弱点,所以牛顿认为万有引力公式~~只是一个假设~~。电磁作用已经显示,物体之间的相互作用并不是超距作用。

惯性系是牛顿理论的基本概念,存在一个基本问题,这就是逻辑循环问题。惯性系的定义为:对一个坐标系,如果不受外力作用的物体,在其中保持匀速直线运动状态或静止状态,那么这个坐标系就是惯性系。什么是不受外力呢?当一个物体在惯性系中保持匀速直线运动状态或静止状态时,它就不受外力。可见,当定义“惯性系”时必须先定义“不受外力”,而定义“不受外力”时,又必须先定义“惯性系”这是一个循环定义。

再一点就是物体的重量和惯性两个完全不同性质的量总是相等的,这一点与牛顿引力理论直接有关。还有其它的问题比如时空问题,我们将在后面讨论。

二、对牛顿引力理论的修改

面对引力理论存在的问题,特别是水星近日点的进动问题,人们提出了很多种修改方案,法国人 Leverrier 设想这可能是因为受水星与太阳之间的一小群行星引起的——结果,未观察到。Newcomb 设想这可能是由于太阳系黄道面上某种物质引起的,可是,他的计算表明,这样解释了水星进动,也产生了水星和金星轨道平面的旋转,这与实际观测不符。

1896年, H. H. Seeliger 设想一个位于接近太阳黄道面上的物质,解释了水星近日点进动,并不引起水星和金星轨道平面旋转,当然,到现在为止,我们并未观察到这种物质,然而, Seeliger 理论还是取得了很大的成功。

后来,有人试图修改万有引力公式,假设它并不严格遵守平方反比定律,在后面加上了一个指数因子,然而,也未成功。

在这一点上爱因斯坦取得了成功，他不是简单地解释了水星进动等问题，而是从全新的概念出发，得出全新的理论——广义相对论，它一问世，便遭到暴风雨般的批评，有些卑鄙的人对爱因斯坦进行人身攻击。据说，刚开始只有两个半人理解广义相对论，爱因斯坦本人、他的一位好友、他的妻子。现在，人们已慢慢理解并接受广义相对论的观点，当然，并不是一致“举手通过”，还存在不同意见，这是科学史上正常的现象。

第二章 爱因斯坦引力理论

现在,物理学界对广义相对论有两种认识,一种认为爱因斯坦的广义相对论是完美无缺的,是时空观的革命,另一种认为广义相对论存在重大问题。爱因斯坦引力理论必须涉及广义相对论,广义相对论是从狭义相对论开始的。

第一节 狭义相对论

广义相对论是从时间和空间的认识入手的,我们不得不离开主线来讲时间和空间。牛顿认为空间是一个与客观物体无关的“空箱子”,物体在空间里存在,这个空间就是绝对、标准的参照系,空间是各向同性、无限“伸长”的,这就符合欧几里得几何的描述。随着认识的深入,人们发现了电磁力,它无明显的惯性,能相互作用,并不需要惯性系来描述,也就是说,我们不用牛顿时空就能完善地描述电磁力,这暗示着对牛顿空间的否定。牛顿的空间体系不允许这样的离开绝对空间而独立存在的物质。如果要保持牛顿体系作为物理学的基础,就必须对电磁力作解释。到目前为止,一切努力都证明对这种电磁描述的 Maxwell 方程是正确的。这样就出现了如下局面,当人们处理电磁力时把它当作独立的非牛顿空间来处理,而处理其它力时又回到了牛顿空间,这并不是马克思、恩格斯所谓的辩证法,事物是“对立统一的”之类的东西,有牛顿的空间

存在,也有非牛顿的空间存在。如果真是这样,我们可以皆大欢喜地不求甚解了——伟大的爱因斯坦并不这样认为,他清醒地认识到,物理学的基础不可能是含糊的图像,要么存在绝对空间,要么就不存在,共存的局面是不能令人满意的。首先对绝对空间提出疑问的是马赫,马赫推测,并不存在什么绝对惯性系,惯性力正像牛顿的其它力一样取决于物体相互作用。说到这里我们就会明白牛顿为什么为证明绝对空间存在而做水桶实验,因为这是一个最基本的概念。爱因斯坦认为平直的空间是任意假设的,也就是说空间的描述用欧几里得描述并不合适。

牛顿认为时间是均匀流失的,而爱因斯坦认为要知道一个事件的时间就要测量。这一测量的工具就是光。每个物体有一个“当地时间”,用光作工具来测量“当地时间”。两个点用光联系起来, $c^2 dt^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$,则 $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = 0$ 。可以看出两个任意的无限靠近的点 ds^2 与坐标系选择无关。这样,当从一个惯性系向另一个惯性系转移时,时间就要发生变化。爱因斯坦怀疑空间惯性系的优越地位和时间的可靠性,就有了狭义相对论的公设。狭义相对论是广义相对论的前身,狭义相对论有两个基本公设:(1)不存在任何一个优越的惯性系。比如在一个匀速运动的火车上作实验与在一个静止的物体上作效果是一样的,而且与匀速运动火车的速度无关。(2)光在真空中传播各向同性,并且与光源的运动速度无关。从这两个公设出发,就可得出以下几个结果。

关于运动物体的长度收缩:长度为 L_0 的尺子,当在运动情况下就不是 L_0 ,而是收缩了,关系式为: $L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$,其中, v 为运动的速度。