13-1 牛顿重力定律 2021年3月28日12点27分

什么是物理？

物理学的长期目标之一是了解引力，即将您固定在地球上，将月球保持在围绕地球的轨道上以及将地球保持在围绕太阳的轨道上的力量。它也延伸到整个银河系，将银河中数十亿颗恒星以及恒星之间无数的分子和尘埃粒子聚集在一起。我们位于这个圆盘状的恒星和其他物质集合的边缘，离银河系中心约2.6×104光年（2.5×1020 m），我们绕其缓慢旋转。引力还跨越整个银河系空间，将银河的局部群聚在一起，除了银河系外，还包括距离地球2.3×106光年的仙女座星系（图13-1），再加上几个更近的矮星系，例如麦哲伦星系大云。本地群是银河系本地超集群的一部分，它被重力吸引到一个巨大的空间区域，称为大吸引子。在银河系的另一侧，这个区域似乎距离地球约3.0×108光年。引力甚至更深远，因为它试图将正在膨胀的整个宇宙凝聚在一起。

这股力量也是宇宙中一些最神秘的结构的原因：黑洞。当一颗比我们的太阳大得多的恒星燃烧时，其所有粒子之间的引力会导致该恒星自身塌陷，从而形成黑洞。在这种坍塌的恒星表面的重力是如此之强，以至于粒子和光都不会从表面逸出（因此称为“黑洞”）。任何太靠近黑洞的恒星都可以通过强大的引力将其撕开并拉入黑洞。这样的足够捕获会产生一个超大质量的黑洞。这种神秘的怪物似乎在宇宙中很常见。确实，这样的怪物潜伏在我们银河系的中心，那里的黑洞称为人马座A \*，其质量约为3.7×106太阳质量。这个黑洞附近的引力如此之大，以至于导致轨道上的恒星绕着黑洞鞭打，在短短15.2 y的时间内完成了一次轨道。尽管对引力的理解还不是很充分，但是我们对引力的理解始于艾萨克·牛顿的引力定律。

牛顿的万有引力定律

在开始讨论方程式之前，让我们先思考一下我们认为理所当然的事情。我们几乎被固定在地面上，没有那么强烈，我们不必爬行就可以上学（尽管偶尔的考试可能会让你爬行回家），而不要那么轻易，以至于我们迈出一步时将自己的头撞到天花板上。这也差不多是对的，这样我们就可以紧紧抓住地面，而不是彼此紧紧抓住（在任何教室里都会很尴尬）或紧紧抓住我们周围的物体（然后，“搭公交车”这一短语将具有新的含义） 。吸引力显然取决于我们自己和其他物体中有多少“东西”：地球上有很多“东西”并产生很大的吸引力，而另一个人却没有“东西”并产生较小（甚至可以忽略）的吸引力。而且，这种“东西”总是会吸引其他“东西”，永远不会排斥它（否则，打喷嚏会使我们进入轨道）。过去，人们显然知道他们被拉下来（特别是如果他们绊倒了），但是他们认为向下的力是地球独有的，与天文物体在天空中的明显运动无关。但是在1665年，现年23岁的艾萨克·牛顿（Isaac Newton）意识到，这支力量负责将月球保持在其轨道上。实际上，他证明了宇宙中的每个身体都吸引着其他所有身体。身体相互靠近的这种趋势称为万有引力，其中涉及的“物质”是每个身体的质量。如果说苹果掉下来激励牛顿遵循他的万有引力定律的神话是正确的，那么吸引力就在于苹果的质量和地球的质量之间。这是可以理解的，因为地球的质量是如此之大，但即使如此，它也只有约0.8N。两个彼此站在一起的人之间的吸引力（令人庆幸）要小得多（不到1 𝜇N）并且难以察觉。

扩展物体（例如两个人）之间的重力引力可能难以计算。 在这里，我们将集中讨论两个粒子（没有大小）之间的牛顿力定律。 设质量为m1和m2，r为它们的间隔。 然后，由于彼此的存在而作用于彼此的重力的大小由下式给出：

G是引力常数：

在图13-2a中，→F是由于粒子2（质量m2）而作用在粒子1（质量m1）上的重力。 该力指向粒子2，因为粒子1被吸引到粒子2，所以被称为吸引力。该力的大小由公式13-1给出。 我们可以将→F描述为从粒子1到粒子2径向延伸的r轴的正方向（图13-2b）。 我们还可以通过使用径向单位矢量rˆ（大小为1的无量纲矢量）来描述→F，该向量沿r轴背离粒子1（图13-2c）。 根据等式13-1，作用在粒子1上的力为

归因于颗粒1的作用在颗粒2上的重力具有与作用在颗粒1上的重力相同的大小，但方向相反。 这两个力形成了第三律力对，我们可以说两个粒子之间的重力具有公式13-1给出的大小。 即使两个粒子之间位于两个粒子之间，该力也不会被其他对象改变。 换句话说，没有物体可以屏蔽另一个粒子免受另一个粒子的引力。 重力的强度（即两个具有给定质量的给定质量的粒子相互吸引的强烈程度）取决于重力常数G的值。如果G（按某种奇迹）突然增加了10倍 ，您将被地球的吸引力压在地板上。 如果将G除以这个因子，地球的吸引力将非常弱，以至于您可能会跳过建筑物。

非颗粒。 尽管牛顿的万有引力定律严格适用于粒子，但只要对象的尺寸相对于它们之间的距离较小，我们也可以将其应用于真实的对象。 月亮和地球之间的距离足够远，因此可以很好地近似地将它们都视为粒子，但是苹果和地球呢？ 从苹果的角度来看，广阔而水平的地球一直延伸到苹果下面的地平线，看起来确实不像是粒子。 牛顿用壳定理解决了苹果地球问题：

均匀的球形物质壳会吸引位于壳外的粒子，就好像所有壳的质量都集中在其中心一样。

可以将地球视为这样一个壳的巢，一个壳在另一个壳内，每个壳在地球表面外吸引一个粒子，就好像该壳的质量位于壳的中心一样。因此，从苹果的角度来看，地球的行为就像一个粒子，位于地球的中心，其质量等于地球的质量。三法力对。假设如图13-3所示，地球将以0.80 N的力向苹果上拉。然后，苹果必须以0.80 N的力在地球上向下拉，我们将其作用在地球中心。用第五章的语言，这些力在牛顿第三定律中形成力对。尽管它们的大小匹配，但是释放苹果时它们会产生不同的加速度。苹果的加速度约为9.8 m / s2，这是地球表面附近坠落物体的常见加速度。然而，在附着于苹果地球系统质心的参考系中测得的地球加速度仅为1×10-25 m / s2。

13-2 引力与叠加原理 2021年3月28日12点55分

给定一组粒子，我们通过使用叠加原理，在彼此之间找到了它们之间的净（或合成）重力。这是一条通用原则，说净效应是各个效应的总和。在这里，原理意味着我们首先要计算由于每个其他粒子而作用在我们选择的粒子上的各个重力。然后，我们可以通过矢量地添加这些力来找到净力，就像在前面各章中添加力时所做的那样。我们来看看最后一句话（可能很快就会读完）中的两个要点。 （1）力是矢量并且可以在不同的方向上，因此我们必须考虑它们的方向将它们添加为矢量。 （如果两个人以相反的方向拉您，则他们施加在您身上的净力明显不同于他们以相同的方向拉您的净力。）（2）我们将各个力相加。想一想，如果净力取决于某个因数随情况而变化的乘数因数，或者一个力的存在以某种方式放大了另一种力的大小，那么世界将变得多么不可能。不，值得庆幸的是，世界只需要对力量进行简单的向量相加。

对于n个相互作用的粒子，我们可以将粒子1上的重力的叠加原理写为

在这里，→F 1，net是由于其他粒子而在粒子1上产生的净力，例如，→F13是来自粒子3的施加在粒子1上的力。我们可以将该方程更紧凑地表示为矢量和：

真实对象。 来自真实（扩展）对象的粒子上的重力又如何呢？ 通过将对象分成足够小的部分以处理为粒子，然后使用公式13-5从所有部分中求出作用在粒子上的力的矢量和，可以找到该力。 在极限情况下，我们可以将扩展的对象划分为不同的部分，每个部分的质量为dm，并且每个部分在粒子上产生不同的力d F。 在此极限下，公式13-5的总和变为整数，我们有

其中积分取于整个扩展对象，然后删除下标“ net”。 如果扩展对象是均匀球体或球壳，我们可以通过假设对象的质量集中在对象的中心并使用公式13-1来避免式13-6的积分。

13-3 地球附近的重力 2021年3月28日13点03分

让我们假设地球是质量为M的均匀球体。来自质量的粒子m上来自地球的重力大小位于地球外部，距地球中心的距离为r，然后由公式13-1给出：

如果粒子被释放，由于引力→F，它会掉落到地球中心，加速度称为引力加速度→a g。 牛顿第二定律告诉我们，量级F和ag与

现在，将F从公式13-9代入公式13-10并求解ag，我们发现

表13-1显示了针对地球表面以上各种高度计算出的g的值。 请注意，即使在400 km处，g也很重要。 从模块5-1开始，我们通过忽略地球的自转来假设地球是一个惯性系。 通过这种简化，我们可以假设粒子的自由落体加速度g与粒子的重力加速度（我们现在称为ag）相同。 此外，我们假设g在地球表面的任何地方的常数值为9.8 m / s2。 但是，由于以下三个原因，在给定位置测量的任何g值都将不同于用公式13-11计算的g值，原因有以下三个：（1）地球质量分布不均匀；（2）地球不是理想球体；以及 （3）地球自转。 此外，由于g与ag不同，相同的三个原因意味着，颗粒的测量重量mg与方程13-9中给出的作用在颗粒上的重力大小不同。 现在让我们检查一下这些原因。

1. 地球的质量不是均匀分布的。 如图13-5所示，地球的密度（单位体积质量）沿径向变化，地壳的密度（外部截面）在地球表面的各个区域之间也不同。 因此，g在表面上的区域之间变化。
2. 地球不是一个球体。 地球大约是一个椭圆形，在两极变平并在赤道隆起。 它的赤道半径（从中心点到赤道）比其极地半径（从中心点到北极或南极）大21公里。 因此，与赤道上的点相比，两极上的点更靠近地球的稠密核心。 这是当您在海平面从赤道向北或南极移动时进行测量时，自由落体加速度g增加的原因之一。 当您移动时，实际上您实际上正在靠近地球中心，因此，根据牛顿的万有引力定律，g会增加。
3. 地球在自转。 旋转轴穿过地球的北极和南极。 位于地球表面上除极点之外的任何地方的物体都必须绕旋转轴旋转一圈，因此必须具有指向圆心的向心加速度。 该向心加速度需要也指向该中心的向心力。

为了了解地球的自转如何使g与g有所不同，让我们分析一个简单的情况，其中质量箱m在赤道上处于刻度。图13-6a显示了从北极上方空间的某个点观察到的这种情况。板条箱的自由图Figurere 13-6b显示了板条箱上的两个力，它们均沿从地球中心延伸的径向r轴作用。来自刻度尺的条板箱上的法向力→FN沿r轴的正方向向外指向。用等价的m a→g表示的重力是向内指向的。由于板条箱在地球旋转时绕地球中心绕行，所以板条箱具有向心加速度→指向地球中心的方向。从公式10-23（ar = 𝜔2r），我们知道该加速度等于𝜔2R，其中𝜔是地球的角速度，R是圆的半径（大约是地球的半径）。因此，我们可以将牛顿第二定律写为沿r轴的力（Fnet，r = mar）为

法向力的大小FN等于在秤上读取的重量mg。 用mg代替FN时，公式13-12给出了

因此，由于地球自转，因此测得的重量小于板条箱上的重力大小。 加速度差。 为了找到g和ag的对应表达式，我们从公式13-13中取消m来写

因此，由于地球自转，测得的自由落体加速度小于重力加速度。 方程式。 加速度g和ag之间的差等于𝜔2R，并且在赤道上最大（由于一个原因，板条箱所行进的圆的半径在那里最大）。 为了找到差异，我们可以使用公式10-5（𝜔 = ∆θ / ∆t）和地球半径R = 6.37×106 m。 对于地球一圈，θ为2𝜋 rad，时间段∆t约为24 h。 使用这些值（并将小时转换为秒），我们发现g仅比ag小约0.034 m / s2（与9.8 m / s2相比很小）。 因此，忽略加速度g和ag的差异通常是合理的。 同样，忽略重量和重力大小之间的差异也常常是有道理的。

13-4 地球内部的引力 2021年3月28日13点19分

牛顿的壳定理也可以应用于粒子位于均匀壳内部的情况，以显示以下内容：

均匀的物质壳不会对位于其内部的粒子施加任何净重力。

注意：此陈述并不意味着来自壳各种元素的粒子上的重力会神奇地消失。 相反，这意味着来自所有元素的粒子上的力矢量之和为零。 如果地球的质量均匀分布，那么作用在粒子上的重力将在地球表面达到最大，并且随着粒子向外移动而远离行星而减小。 如果粒子向内移动，也许沿着深部的矿井向下移动，则重力将发生变化，原因有两个。 （1）它会趋于增加，因为粒子将移近地球中心。 （2）它会趋于减少，因为位于粒子径向位置之外的材料的加厚壳不会对粒子施加任何净力。

为了找到统一地球内部引力的表达方式，让我们使用乔治·格里菲斯（George Griffith）早期的科幻小说《极对极》中的情节。 三个探险家试图通过太空舱直接从南极到北极穿过一条自然形成的（当然是虚构的）隧道。 图13-7显示了当胶囊离地球中心的距离r下降时的胶囊（质量m）。 在那一刻，胶囊上的净重力是由于半径为r的球体内部的质量Mins（由虚线轮廓包围的质量）引起的，而不是球形外层壳体（虚线轮廓之外）的质量Mins引起的。 此外，我们可以假设内部质量Mins是作为粒子集中在地球中心的。 因此，我们可以将公式13-1写成胶囊上重力的大小，如

因为我们假设密度为ρ，所以我们可以用地球的总质量M及其半径R来表示内部质量：

解决分钟问题，我们发现

将Mins的第二个表达式代入公式13-17，可以得出胶囊上重力的大小，它是胶囊距地球中心的距离r的函数：

根据格里菲斯（Griffith）的故事，当太空舱接近地球中心时，作用在探索者身上的重力变得惊人地大，恰好在中心处，它突然消失了，但只是瞬间消失了。 从公式13-19中我们可以看到，实际上，力的大小随着胶囊接近中心而线性减小，直到其在中心为零为止。 至少格里菲斯（Griffith）正确地零了中心细节。

方程13-19也可以用力矢量F→和胶囊的位置矢量→r沿从地球中心延伸的径向轴来表示。 令K代表等式13-19中的常量集合，我们可以将力以矢量形式重写为

在其中插入了减号以表示F→和→r具有相反的方向。 公式13-20具有胡克定律的形式（公式7-20，→F = -k→d）。 因此，在故事的理想条件下，胶囊会像弹簧上的方块一样振动，振动的中心在地球的中心。 太空舱从南极落到地球中心后，它将从中心向北极移动（如格里菲斯所说），然后再返回，直到永远重复一次。 对于肯定具有不均匀质量分布的真实地球（图13-5），当胶囊下降时，作用在胶囊上的力最初会增加。 然后，该力将在某个深度达到最大值，直到胶囊进一步下降时，才开始减小。

13-5 重力势能 2021年3月28日13点29分

在模块8-1中，我们讨论了粒子-地球系统的重力势能。我们小心地将粒子保持在地球表面附近，以便可以将重力视为恒定。然后，我们选择系统的一些参考配置，使其重力势能为零。通常，在这种配置下，粒子位于地球表面。对于不在地球表面的粒子，当粒子与地球之间的距离减小时，重力势能会减小。在这里，我们拓宽了视野，并考虑了质量为m和M的两个距离为r的粒子的重力势能U。我们再次选择U等于零的参考配置。但是，为了简化方程式，参考配置中的分离距离r现在足够大，可以近似为无穷大。如前所述，当间隔减小时，重力势能减小。由于当r =∞时U = 0，所以对于任何有限的分离，势能都是负的，并且随着粒子向彼此靠近的方向逐渐变大。

考虑到这些事实，接下来我们将要证明的是，我们将两粒子系统的引力势能设为

请注意，随着r接近无穷大，U（r）接近零，并且对于r的任何有限值，U（r）的值为负。语。公式13-21给出的势能是两个粒子的系统的性质，而不是单独一个粒子的性质。没有办法将这种能量分开，说这么多属于一个粒子，那么多属于另一粒子。但是，如果M⪢m（对于地球（质量M）和棒球（质量m）而言，确实如此），我们通常会说“棒球的势能”。我们之所以能够避免，是因为当棒球在地球附近移动时，棒球的势能发生了变化-地球系统几乎完全表现为棒球动能的变化，因为地球的动能发生了变化太小而无法测量。同样，在第13-7单元中，我们将说“人造卫星的势能”绕地球旋转，因为人造卫星的质量比地球的质量小得多。但是，当我们谈论质量可比的物体的势能时，我们必须谨慎地将它们视为一个系统。

多个粒子。 如果我们的系统包含两个以上的粒子，则依次考虑每对粒子，并使用公式13-21计算该对粒子对的重力势能，就好像其他粒子不在那儿一样，然后对结果进行代数求和。 例如，将公式13-21应用于图13-8的三对中的每对，得出系统的势能为

方程13-21的证明

让我们沿图13-9中的路径直接射击远离地球的棒球。 我们想找到一个表示球沿其路径在点P上的重力势能U的表达式，该点距地球中心的径向距离为R。 为此，我们首先找到当球从点P到达距地球很大（无限）距离时，重力在球上所做的功W。 由于重力→F（r）是可变力（其大小取决于r），因此必须使用模块7-5的技术来查找功。 用矢量符号，我们可以写

积分包含力→F（r）和沿球的路径的微分位移矢量d→r的标量（或点）乘积。 我们可以将该产品扩展为

𝜙是→F（r）和d→r方向之间的夹角。 当我们用180°代替𝜙并用公式13-1代替F（r）时，公式13-24变为

将其代入公式13-23并积分得到

其中W是将球从点P（距离R）移动到无穷大所需的功。 公式8-1（∆U = -W）告诉我们，我们还可以将势能表示为

因为无穷大处的势能U∞为零，U是P处的势能，并且W由公式13-25给出，所以该公式变为

将R切换为r可得到公式13-21，我们将进行证明。

路径独立

在图13-10中，我们沿着由三个径向长度和三个圆弧（以地球为中心）组成的路径将棒球从A点移动到G点。 当球从A移到G时，地球的引力→F对球的总功W引起了我们的兴趣。沿着每个圆弧所做的功为零，因为→F的方向在每个点都垂直于弧 。 因此，W是仅→F沿三个径向长度所做的功的总和。 现在，假设我们在精神上将弧缩小为零。 然后，我们将沿单个径向长度将球直接从A移动到G。 这会改变W吗？ 否。因为没有沿着弧线进行任何工作，因此消除弧线不会改变工作。 现在从A到G的路径明显不同，但是→F所做的工作是相同的。

我们在模块8-1中以一般方式讨论了这样的结果。 关键在这里：引力是保守力。 因此，重力对从初始点i到最终点f移动的粒子所做的功与在这些点之间采取的路径无关。 根据公式8-1，从点i到点f的重力势能的变化ΔU为：

由于由保守力完成的功W与实际路径无关，因此重力势能的变化ΔU也与路径无关。

势能和力

在公式13-21的证明中，我们从力函数→F（r）导出了势能函数U（r）。 我们应该能够走另一条路-即从势能函数开始并推导力函数。 根据公式8-22（F（x）= −dU（x）/ dx），我们可以写成

这是牛顿的万有引力定律（等式13-1）。 负号表示作用在质量m上的力指向质量M径向向内。

逃生速度

如果您向上发射弹丸，通常它将减速，暂时停止并返回地球。 但是，存在一定的最小初始速度，它将使它永远向上移动，理论上仅在无穷远处停止。 该最小初始速度称为（地球）逃逸速度。 考虑质量为m的射弹，使行星（或其他天文物体或系统）表面的逃逸速度为v。该射弹的动能K由1 2 mv2给出，势能U由公式13-21给出 ：

其中M是行星的质量，R是其半径。 当弹丸达到无穷远时，它停止运动，因此没有动能。 它也没有势能，因为两个物体之间的无限分隔是我们的零势能配置。 因此，它在无穷大时的总能量为零。 根据能量守恒定律，它在地球表面的总能量也必须为零，因此

请注意，v不取决于从行星发射弹丸的方向。 但是，如果当行星围绕其轴旋转时，朝发射位置移动的方向发射弹丸，则达到该速度会更容易。 例如，由于地球自转，火箭在卡纳维拉尔角向东发射，以利用海角向东的1500公里/小时的速度。 方程13-28可以用于从任何天文物体中找到弹丸的逃逸速度，只要我们用物体质量代替M并用半径R替代。表13-2显示了一些逃逸速度。

13-6 行星和卫星：开普勒定律 2021年3月28日13点57分

自从历史的曙光以来，行星的运动似乎在恒星的背景下徘徊，这一直是一个难题。 如图13-11所示，火星的“循环运动”特别令人困惑。 约翰内斯·开普勒（Johannes Kepler，1571-1630年）经过一生的研究，制定了控制这些运动的经验定律。 第谷·布拉赫（Tycho Brahe，1546–1601年）是最后一位无需借助望远镜进行观测的伟大天文学家，他汇编了广泛的数据，开普勒由此得以推论出行星运动的三个定律，这些定律现在以开普勒的名字命名。 后来，牛顿（1642-1727）指出，他的万有引力定律导致开普勒定律。 在本节中，我们将讨论开普勒的三个定律。 尽管在这里我们将定律应用于绕太阳公转的行星，但它们对于自然或人造卫星，环绕地球或任何其他大型中心体的卫星同样适用。

轨道定律：所有行星都在椭圆轨道上运动，太阳是一个焦点

图13-12显示了一个质量为m的行星围绕太阳在这样的轨道上运动，其质量为M。我们假设M⪢m，因此行星–太阳系的质量中心大约位于太阳的中心。 太阳。 通过给出半长轴a和偏心距e来描述图13-12中的轨道，后者的定义为ea是从椭圆中心到焦点F或F'的距离。 零偏心率对应于一个圆，其中两个焦点合并到一个中心点。 行星轨道的偏心率不大； 因此，如果按比例绘制轨道，则它们看起来是圆形的。 为了清楚起见，夸大了图13-12的椭圆的偏心率为0.74。 地球轨道的偏心率只有0.0167。

区域定律：将行星连接到太阳的直线以相等的时间间隔在行星轨道平面内扫出相等的区域； 即，扫出区域A的速率dA / dt是恒定的。

定性地讲，第二定律告诉我们，当行星离太阳最远时，它的运动最慢，而离太阳最近时，它的运动最快。 事实证明，开普勒第二定律完全等同于角动量守恒定律。 让我们证明这一点。

图13-13a中的阴影楔形区域的面积接近于通过连接太阳和行星的直线在时间Δt中扫出的面积，两者之间的距离为r。 楔形区域的∆A大约是底数为r ∆θ并且高度为r的三角形的面积。 由于三角形的面积是底数乘以高度的二分之一，因此∆A≈1 2 r 2∆θ。 随着Δt（因此Δθ）趋近于零，ΔA的表达式变得更加精确。 然后，立即清除区域的瞬时速率

其中𝜔是连接太阳和行星的直线的角速度，因为该直线绕太阳旋转。 图13-13b显示了行星的线性动量→p以及→p的径向分量和垂直分量。 根据公式11-20（L =rp⊥），行星绕太阳的角动量L→的大小由r和p⊥的乘积给出，即r垂直于r的→p的分量。 在这里，对于质量为m的行星，

在这里，我们用等价的𝜔r代替了v⊥（等式10-18）。 在公式之间消除r2𝜔。 13-30和13-31导致

如开普勒所说，如果dA / dt是恒定的，则公式13-32意味着L也必须是恒定的-角动量是守恒的。 开普勒的第二定律的确等于角动量守恒定律。

周期定律：任何行星的周期的平方都与其轨道的半长轴的立方成正比。

为此，请考虑图13-14的圆轨道，其半径为r（圆的半径等于椭圆的半长轴）。 将牛顿第二定律（F = ma）应用于图13-14中的绕行行星

在这里，我们已从公式13-1替代了力大小F，并使用公式10-23将𝜔2r替代了向心加速度。 如果现在我们使用公式10-20将𝜔替换为2𝜋 / T，其中T是运动的周期，我们将获得开普勒第三定律：

括号中的数量是一个常数，仅取决于行星绕其运行的中心体的质量M。 方程13-34也适用于椭圆轨道，只要我们用椭圆的半长轴a代替r。 该定律预测，对于给定质量物体周围的每个行星轨道，比率T 2 / a3具有基本相同的值。 表13-3显示了它对太阳系行星轨道的保持程度。

13-7 卫星：轨道和能量

当卫星以椭圆形轨道绕地球旋转时，固定其动能K的速度和固定重力势能U的距地球中心的距离都以固定的周期波动。 但是，卫星的机械能E保持恒定。 （由于卫星的质量比地球的质量小得多，因此，我们将地球卫星系统的U和E分配给单独的卫星。）

系统的势能由公式13-21给出：

（对于无限分离，U = 0）。 在此，r是卫星的轨道半径（暂时假定为圆形），M和m分别是地球和卫星的质量。 为了找到卫星在圆形轨道上的动能，我们写牛顿第二定律（F = ma）为

其中v2 / r是卫星的向心加速度。 然后，根据公式13-37，动能为

向我们显示，对于圆形轨道的卫星，

轨道卫星的总机械能为

这告诉我们，对于圆形轨道上的卫星，总能量E是动能K的负数：

对于半长轴a的椭圆轨道上的卫星，我们可以用公式13-40中的r代替a来找到机械能：

公式13-42告诉我们，一颗轨道卫星的总能量仅取决于其轨道的半长轴，而不取决于其偏心率e。 例如，图13-15中显示了四个具有相同半长轴的轨道。 同一颗卫星在所有四个轨道上的总机械能E相同。 图13-16显示了绕大质量中心体绕圆形轨道运动的卫星的K，U和E随r的变化。 注意，随着r的增加，动能（以及轨道速度）也随之减小。

13-8 爱因斯坦与引力

等效原理

爱因斯坦曾经说过：“我曾经是。 。 。 在伯尔尼的专利局中，突然间我想到：“如果一个人自由下落，他将不会感到自己的体重。”我大吃一惊。 这个简单的想法给我留下了深刻的印象。 它促使我转向万有引力理论。”

因此，爱因斯坦告诉我们他如何开始形成相对论的一般理论。 这种关于引力（物体相互引力）的理论的基本假设被称为等价原理，它说引力和加速度是等效的。 如果物理学家被锁在一个如图13-18所示的小盒子中，他将无法分辨盒子是否在地球上静止（并且仅受地球引力的作用），如图13-18a所示，或者 如图13-18b所示，以9.8 m / s2的速度在星际空间加速（并且仅受产生该加速度的力的影响）。 在这两种情况下，他都会感到相同，并且在磅秤上读取的重量值也相同。 此外，如果他看着一个物体从他身上掉下来，那么在这两种情况下，该物体相对于他的加速度都将相同。

空间曲率

到目前为止，我们已经将引力解释为是由于质量之间的力引起的。爱因斯坦证明，引力是由质量引起的空间弯曲引起的。 （正如本书稍后所讨论的，空间和时间是纠缠的，因此爱因斯坦所说的曲率实际上是时空的曲率，即我们宇宙的四个维度的总和。）难的。打个比方可能会有所帮助：假设我们从轨道上观看了一场竞赛，其中有两艘船从地球赤道开始，相距20公里，向南行驶（图13-19a）。对于水手而言，船只沿着平坦，平行的路径行驶。但是，随着时间的流逝，船只汇聚在一起，直到它们接近南极为止。船上的水手可以根据作用在船上的力一起解释该图。但是，从太空上看，我们可以看到，由于地球表面的曲率，这些船汇聚在一起。我们之所以能看到这一点，是因为我们正在从表面的“外部”观察比赛。

图13-19b显示了一个类似的种族：两个水平分离的苹果从地球上方相同的高度掉落。 尽管这些苹果看起来似乎沿着平行的路径行进，但它们实际上彼此相对移动，因为它们都落在地球的中心。 我们可以用地球上苹果的重力来解释苹果的运动。 我们还可以根据地球附近空间的曲率（由于存在地球质量而产生的曲率）来解释运动。 这次我们看不到曲率，因为我们无法获得弯曲空间的“外部”，就像我们在船示例中获得弯曲地球的“外部”一样。 但是，我们可以使用图13-19c之类的图来描绘曲率；参见图13-19c。 在那里，由于地球的质量，苹果会沿着向地球弯曲的表面移动。

当光通过地球附近时，由于那里的空间弯曲，光的路径会略微弯曲，这种现象称为重力透镜。当光通过质量更大的结构（例如星系或质量较大的黑洞）时，其路径可能会弯曲得更多。如果在我们与类星体（极亮，极远的光源）之间有这样一个巨大的结构，则来自类星体的光会绕着该巨大的结构弯曲并朝向我们（图13-20a）。然后，因为光线似乎是从天空中一些稍微不同的方向射向我们的，所以我们在所有这些不同的方向上看到了相同的类星体。在某些情况下，我们看到的类星体融合在一起形成一个巨大的发光弧，称为爱因斯坦环（图13-20b）。我们是否应该将引力归因于存在质量或由于质量之间的力而引起的时空弯曲？还是我们应该将其归因于某些现代物理学理论中所推测的称为引力子的基本粒子的作用？尽管我们的引力理论在描述从坠落的苹果到行星运动和恒星运动的一切方面都取得了巨大的成功，但无论从宇宙学尺度还是量子物理学尺度，我们都还没有完全理解它。