

引力物理的现在和未来

PRESENT AND FUTURE OF GRAVITATIONAL PHYSICS

方励之

引力普适性

引力物理学是物理学各个分支中历史最长的一个。从牛顿发表《自然哲学的数学原理》算起，已经有301年的历史了。实际上，在牛顿之前，为了解释行星为什么绕着太阳旋转，早已有人提出太阳对行星有吸引力。

牛顿的贡献首先在于认识到引力具有普适性，或万有性，即：任何物体无例外地都参与引力相互作用。牛顿意识到引力万有性，是在1684年底。该年11月，在《原理》的前身《论运动》的初稿中，牛顿还只考虑太阳对行星的引力，并没有考虑任何其他物体的引力。即认为，只有太阳有引力，而其他物体没有。依照这种理论，行星绕太阳的轨道应当是一严格的椭圆。观测证明，行星轨道并不是严格的椭圆，并且“任何一颗行星的轨道依赖于其他所有行星的合成运动”。这个现象，仅用太阳引力是无法解释的。这样，在1684年12月《论运动》的修改稿中，牛顿开始提到，只有计及“行星彼此之间的作用”，才能说明行星运动。这等价于说，引力不仅是太

阳的属性，同样也是行星的属性。到1685年，牛顿更进一步写道：“依此定律，一切物体必定相吸引”。这就是万有引力了。

为什么引力有此普适性、万有性？

牛顿和牛顿之后的许多物理学家都意识到，引力普适性集中表现在下列性质中：各种物体的引力质量都等于它的惯性质量，或者，

$$\frac{\text{引力质量}}{\text{惯性质量}} = \text{普适常数} \quad (1)$$

它与具体的物体性质并无关系。因此，引力普适性的正确程度，可以通过对公式(1)的实验检验来表示。

事实上，在牛顿之前，伽利略就作过实验来检验公式(1)。在有名的比萨斜塔实验中，伽利略研究不同材料构成的球，如果它们同时从塔上下落，是否同时到达地面。他发现下落时间与物体的具体特征无关，大家都一样。这实质就是公式(1)的普适性，不过伽利略本人当时并没有直接认识到这一点。

牛顿本人则自觉地进行了类似比萨斜塔的实验。当时精度不

高，他只证明在 10^{-3} 的精度上，公式(1)是成立的。后来，贝塞尔作过更仔细的测量。上世纪末，匈牙利物理学家厄缶对公式(1)进行了长期的实验。他证明，在精度 10^{-9} 的程度上公式(1)是正确的。

爱因斯坦在建立广义相对论时，大大强调了公式(1)的价值，把它作为广义相对论的出发点——等效原理。爱因斯坦写道：“在引力场中一切物体都具有同一加速度。这条定律也可以表述为，惯性质量同引力质量相等的定律。它当时就使我认识到它的全部重要性。我为它的存在感到极为惊奇，并猜想其中必定有一把可以更加深入地了解惯性和引力的钥匙。”

这样一来，检验公式(1)的正确性变得更加重要了。60年代初，美国普林斯顿迪克(Dicke)改进了厄缶实验，精度达到 10^{-11} 。随后不久，苏联莫斯科布朗斯基(Branginsky)使精度进一步提高到 10^{-12} 。

更高精度的实验，正在计划中。其中之一是精密监视月亮地球之间距离的变化。按等效原理

(1), 在太阳的引力作用下, 地球和月亮应当有完全相同的加速度, 就像比萨斜塔实验中不同的球有同样的加速度一样。如果地球和月亮的加速度稍有不同, 则地球和月亮之间的距离就会有系统性的变化。阿波罗14号登月飞行时, 已经在月亮上放置了一个角反射器, 使我们能用激光方法精确测定月地距离, 目前的精度是10厘米。相信在不久将来还可以提高约10倍, 即我们可以监视月地之间1厘米左右的微小变化。

另外一个计划是在空间实验室进行厄缶实验。空间环境可以消除许多地面实验中的不利因素。一个方案在空间飞船中作实验, 估计精度可达 10^{-15} , 即比迪克和布朗斯基的结果高3、4个量级。更好的实验应在无引力自由飞行器中去做, 在这种条件下, 可再提高三个量级, 达到 10^{-18} 。

引力的“磁性”

按照爱因斯坦的广义相对论, 引力的普适性实质是由于引力是时空弯曲的表现。在有引力作用的区域中, 时间空间不是平直的, 而是弯曲的。因为, 任何物体都要在时间空间中运动, 所以, 没有任何物体能免于引力作用。爱因斯坦的广义相对论虽然在概念上与牛顿的引力理论十分不同, 但是在太阳系范围里, 广义相对论的推论与牛顿理论的推论, 没有什么差别, 只有极小的不同。比如, 按照牛顿理论, 在太阳引力场中, 任何质点m的引力势能是

$$U = -\frac{GM_{\odot}m}{r} \quad (2)$$

其中G是引力常数, $M_{\odot}$ 是太阳质量, r是距太阳的距离。而按照广义相对论, 上式应当修正为

$$U = -\frac{GM_{\odot}m}{r} - \frac{3}{2} \left(\frac{GM_{\odot}}{c^2 R} \right) \frac{GM_{\odot}m}{r} + \dots, \quad (3)$$

其中R是太阳半径。上式第二项是个修正项, 与第一项相比, 它小了一个因子 $\left(\frac{GM_{\odot}}{c^2 R}\right) \sim 10^{-6}$ 。即只有百万分之一的修正。

水星近日点进动已经在0.5%的精度上证明了公式(3)。另外两个著名的广义相对论检验是引力红移及光线偏折。前者的精度已达 10^{-4} , 后者为2%。

以上几个实验只涉及引力的“电”方面, 而没有涉及“磁”方面。由公式(2)及(3)看到, 这种引力势的表达式, 在形式上与静电势是相似的。任何电荷都会在其周围引起静电势, 类似地任何质量都会在其周围引起引力势。牛顿引力论中, 引力只有“电”方面, 广义相对论对“电”分量的影响是引起公式(3)表示的小修正。广义相对论更重要的结论之一是引力也有“磁”分量。这在牛顿引力论中是不存在的。

电磁学告诉我们, 运动的电荷不仅有电场也有磁场, 例如, 作圆周运动的电荷具有磁矩, 磁矩与磁矩之间的作用, 是一种典型的磁相互作用。类似地, 运动的质量将引起引力的“磁”分量, 旋转的物体会有引力“磁”矩。两个旋转物体之间会有引力“磁”矩的相互作用。这一点在牛顿引力理论中是完全没有的。按牛顿引力论, 两个物体的引力只决定于二者的质量, 并不与二者旋转运动方向有关。因此, 检验是否存在引力“磁”分量, 成为区别牛顿理论及爱因斯坦理论的关键之一。

检验的方法是利用旋转物体。例如, 在空间放置一个陀螺。按牛顿理论, 地球引力不产生力矩, 陀螺方向应保持不变。但是, 按广义相对论, 陀螺的旋转与地球的旋转之间有引力“磁”作用, 所以, 陀螺的方向一般说会发生进动, 进动的方向及速率决定于地球的转动。这种相互作用十分像原子物理中的自旋—自旋相互

作用。自旋—自旋相互作用很微弱, 只引起原子光谱中的超精细结构。陀螺与地球之间的引力“磁”作用也十分微弱。如果将陀螺放置于600公里的高空, 最大的进动速率只为0.044弧秒/年。

美国斯坦福大学正在进行这一项相对论陀螺实验。他们准备发射一个空间装置, 其中有四个陀螺。陀螺由石英球制成, 直径约4厘米, 所有陀螺都置于1.6K的低温。使方向精度达到每年变化不大于0.001弧秒。这样就有可能测出广义相对论的“磁”效应。

寻找引力波

电磁波是一种电场磁场之间相互变化的运动形态。引力有“电”分量和“磁”分量, 所以类似地推论应当有引力波。这个预言早在1918年就由爱因斯坦给出了, 但是, 至今还没有直接探测到引力波。这是由于引力波的作用实在太弱了, 目前实验条件还没有达到所需的灵敏度。尽管如此, 近二十年来, 探测引力波的工作受到越来越大的关注。因为, 在经典物理范围, 即非量子物理范围中, 只有引力波预言未被直接证实了。探测引力波常被称为最后一个有待完成的经典物理实验。

刺激加紧引力波探测的另一个因素是在天体物理中已发现了存在引力波的定量证据。最有名的一个是脉冲星双星PSR1913+16。这是由两颗致密星组成的双星体系。它们是一种典型的引力辐射源。引力辐射能把双星的能量慢慢带走, 使整个双星体系的能量变小。结果使双星的周期越来越短。对PSR1913+16的周期变化已经监视了十年以上, 证实它的周期变小率为每年 $(2.71 \pm 0.10) \times 10^{-9}$ 。而按广义相对论预言的值是每年 $(2.715 \pm 0.002) \times 10^{-9}$ 。二者相符如此之

好,使人们对引力波理论极有信心。

直接探测引力波的关键是建造灵敏的引力波天线。引力波的作用是能使物体发生扭曲和变形。因此,所有引力波天线的目的是测量极小的扭曲或变形。最简单的天线就是一根棒,在引力波作用下它会伸长、缩短而产生应变。目前,测量微小应变的灵敏度已达到 10^{-18} 。看来还可以提高,直到测不准关系给出的量子极限。

另一种天线是用激光干涉方法。原理同一般的干涉仪一样,只是光程特别大,这样容易测量微小的变化。比如,用30~40米的光程,应变测量灵敏度可以达到 10^{-17} 。现已有计划发展一种长达5公里的干涉仪,它的灵敏度估计为 10^{-20} 。由于地面存在一些不可避免的噪声,像声音、地震等的干扰,再进一步提高灵敏度只有将干涉仪放到空间中去。在空间中放置一个光程10公里的干涉仪,其灵敏度约有 10^{-22} 。

如此灵敏的天线是否就能直接探测到引力波呢?在自然界天体有三种类型的引力辐射。一种是脉冲式的,一种是有固定频率的,一种是无规的背景。超新星爆发、引力坍缩等突发性事件会发射脉冲式引力波,它的强度较大,但时间短暂。双星,或其他的一些旋转天体会发射确定频率的引力波。引力波背景则是许多无规运动留下来的,其中包括宇宙极早期中的物理过程所发射的引力波。由于这三类引力波的强度都决定于一些不完全确定的参数(如星体的形状等),所以,我们不能十分肯定地说,上述各种引力波天线其灵敏度是否已足够探测到引力波,但从合理的估计看,它们已有极大的可能探测到引力波。特别是最近超新星S N 1987A的出现,进一步增强了信心。因为,有关S N 1987A的研究支持了引力坍缩理论,所以,

根据相同理论所预言的引力波强度,也多半是合理的。我们有相当的把握说,如果出现一颗银河系内的超新星,用现有的或稍加改进的引力波天线就可以测到引力波了。

理论的课题

直到50年代爱因斯坦去世时,他的广义相对论只有相当少的人注意,没有太多的理论进展。60年代开始,由于相对论天体物理的发展,刺激人们再去研究广义相对论本身的一些基本问题。其中最重要的成果有以下几个:

1. 引力坍缩。证明质量大于某一临界质量的星体,在其演化末期一定会发生引力坍缩,形成黑洞。

2. 奇点定理。在相当宽的条件下证明,引力方程的解必定含有奇性,例如宇宙早期必定有奇性,引力坍缩也导致奇性。

3. 正能定理。任何体系的总能量不可能变成负的。

正能定理彻底免除负能带来的困难。但引力坍缩和奇点定理却着实带来了“灾难”。因为,这二者断言,我们不可避免于奇性。所谓奇性就是因果规律不再适用的地方,这将给以因果性作为基本依据的物理学带来很大困惑。

解脱困惑的途径之一是相信以下猜测:奇点虽然存在,但我们不可能观测到奇性,或奇性与我们之间原则上不存在联系。这样,至少在与我们有关的范围中,物理学的原则不会被破坏。这猜测称为宇宙监督原理。这个原理目前还只是猜测,因此,证明或证否宇宙监督原理是引力理论中的重要课题。

然而,即使宇宙监督原理被证明了,我们仍无法完全摆脱奇性影响。因为,作为大爆炸宇宙起点的奇性是肯定对我们有影响的。如果宇宙起源于奇性,那末原则上就不可能研究宇宙的初始

条件,也就原则上不可能完全了解我们的宇宙的演化史。

这种情形迫使我们去研究量子引力理论。广义相对论是经典的理论。奇性的存在可能只是表明理论本身的适用范围,而并不表明物理学有“灾难”。因此,很早就有人猜测,也许考虑到量子性的引力理论后,奇性就消失了。这种猜测最早得到的支持是黑洞的蒸发。这是1974年由霍金完成的一项重要研究。按经典理论,黑洞是只可吸收不会发射的,质量只能增加不能减少的。然而,如果考虑黑洞之外的真空具有量子化场的起伏,黑洞就可能发射,而使自身的质量变小。当然,这还不是全面的量子引力论,而只是引力对量子场的影响。

促使人们加紧研究量子引力论的另一个动机来自粒子物理。粒子理论当前最热门的课题是寻找统一,即建立不同相互作用之间的统一。弱相互作用与电磁相互作用之间的统一已经完成。大统一理论的目的是将弱、电磁、强三种相互作用都统一在一起。从统一的原则,从统一的具体方案等方面都已显示出必须考虑引力作用与其他作用的统一,即自然界所有相互作用,引力、弱、电磁、强等相互作用的统一。研究这种统一,其实质也就是建立量子引力理论。

引力理论与量子理论之间的统一是十分困难的,这可以从以下的论证看到一点。首先,引力论中有一条普遍的结论:引力场中不同位置不同速度的钟,将测出不同的时间。因此,精确的时间测量必须精确地知道钟在引力场中的位置及速度。另一方面,量子论则断言:原则上不可能同时精确地知道任何物的位置及速度。这样,把引力论与量子论二者加在一起,结论就是:原则上不可能进行精确的时间测量。就定量而言,时间测量精度不可能

超过 10^{-44} 秒,即不可能测量比 10^{-44} 秒小的时间间隔。类似地,长度测量精度也不可能超过 10^{-33} 厘米,即不可能测量比 10^{-33} 厘米小的距离。

由物理学方法论,一个原则上不能直接或间接测定的物理量,在物理中是没有意义的。这就是说,在小于 10^{-44} 秒和 10^{-33} 厘米的范围内,时间和长度概念将失去意义。由时间和长度派生出来的其他概念,也随之失效。总之,引力与量子二者的结合将导致时空概念本身的改变。这就是量子引力论面对的难题之一。

为了克服这些困难,已经提出了不少有价值的思想。这里只简单地列举一下:正则量子化,协变微扰理论,欧几里得量子引力论,弯曲时空中的量子场论,诱生引力论,几何量子化,缠绕子理论,离散引力,曲率平方理论,非线性量子力学,自旋网络,渐近量子化,量子宇宙学,超引

力理论, K-K理论以及近年最热门的超弦理论。

今天我们还不可能对这些尝试作进一步的评论。也许只能说,量子引力论的成功,大概需要各种尝试的协同努力。

引力物理的开放

笔者正在参与明年将在美国科罗拉多举行的国际广义相对论及引力学会第十二次大会的组织工作。一位资深的同行说:“在这个学会刚刚建立的时候,经典广义相对论是个多产而独立的领域,学会本身也有一个非常清楚的科学家‘圈子’。现在情况完全不同了。其他两个强有力的‘圈子’中的物理学家,即天体物理学家及粒子物理学家已经大量涌入引力物理研究”。

的确,这是一种趋势。回顾一下引力物理的发展史,从牛顿到爱因斯坦,引力物理的确有一系列影响着物理全局的创造。但

是,由于引力是自然界最弱的相互作用,所以,就具体研究来说,引力物理一直是个独立的即相当孤立的领域,它与其他物理分支的联系极少。但近二十年来,渐渐改观了。一方面在宇宙学和高能天体物理中,引力物理和高能物理、天体物理之间难于划界了。另一方面,在微引力物理中,引力也开始进入凝聚态物理和材料科学。

对这些交叉领域中的课题,我们不再讨论了,一一列举也不必要了。当然,不列举并不表明它对引力物理不重要。相反,引力物理的未来,也许正是在引力物理的这种开放式发展之中。

参考文献

1. Physics Through the 1990s, Gravitation, Cosmology and Cosmic-Ray Physics, National Academy Press, (1986).
2. 方励之, 物理, 16, (1987), 481.
3. 方励之, 物理, 17, (1988), No. 5.

(上接第10页)

而不能把更远的目标当成中近期目标来对待。所谓政治权力高度集中下的商品经济体制恰恰是这一时滞的表现,它有利于经济发展并为政治民主化提供了先决条件。南朝鲜和巴西的经验似乎就表明了这一趋向。1961年朴正熙军政府建立时,人均国民总值只有87美元,到80年代达到3 000美元后,全斗焕政权不得不进行了转轨,由“政府主导”改为“民间主导”,80年代中期后,又不得不让位于“民选政府”。巴西1964年军政府上台后,经济得到迅速的发展,20年后,军政府已让位于“民选政府”。

由上述分析可以得出结论:发展中国家的某一特定发展阶段,不仅是经济,而且是政治社会急剧变化的时期。在这一时期的阶段目标是经济发展,而为了保证这种经济发展不至于被内外因素所打断,社会的相对稳定是非常重要的,唯有这样才能为政治民主化提供基础。而要想缔造这样一种局面,使经济社会发展有序地进行,在这一发展阶段,较佳的体制模式是政治权力高度集中下的商品经济体制。

(上接第29页)

交换裂距与温度的关系;研究玻璃态非晶材料的结构和几个分子层厚的液晶的相变;研究表面的结构和催化活性;可在光刻蚀中产生线度小至70 Å的人造结构。目前同步辐射已成为广泛实验领域的最有用的工具之一。

11. 原子级分辨率的实验探测 在过去10年,实验研究凝聚体仪器方面的主要进展是发展了几种能观测单个原子的探测器,其中一种是扫描真空隧道显微镜,它的原理是利用电子的量子力学隧道效应,由此效应产生的电流对于从探针到样品的距离是很敏感的。现在已可利用这种仪器直接观测样品表面原子级的结构。另外的一些进展是1982年生产了分辨率达到约1.5 Å的透射电子显微镜,可以研究沿电子束方向的样品内线型和平面型缺陷,也可研究完美晶体的薄膜样品的原子位置;还研制成了分辨率约2 Å的扫描透射电子显微镜,利用它可以得到碳膜中的重原子象。可以期望将来这些仪器可越来越多地用来直接测定固体内部和表面的原子位置。