

# 广义相对论及其实验证明

张元仲

(中国科学院理论物理研究所 100190)

爱因斯坦 1905 年提出的狭义相对论(平直时空理论)用狭义相对性原理代替伽利略相对性原理,即所有动力学方程式都要在洛伦兹坐标变换下保持形式不变。牛顿力学第二定律很容易修改得满足这种要求并且已经纳入狭义相对论的第一篇论文之中。但是,牛顿万有引力定律却很难修改成平直时空中的引力理论。为此,爱因斯坦经过十年的不懈探索最终以广义协变原理和局部等效原理为基础于 1915 年建立了弯曲时空的引力理论即广义相对论(1916 年发表)。广义相对论的引力场方程是引力势的高度非线性方程;在没有外力(引力除外)的情况下物体在引力场中沿测地线运动(也就是满足弱等效原理的自由落体运动);在弱场和低速近似下广义相对论近似为牛顿引力和牛顿力学第二定律。本文将简要介绍广义相对论的两个基本假设和各种预言及其实验检验,例如:广义协变原理、等效原理、磁型引力(或说引力磁场)效应、时钟变慢与引力红移、引力波、光线偏折(引力透镜)、行星近日点进动、雷达回波的时间延迟、中子星、引力塌缩与黑洞、黑洞热力学与霍金辐射、大爆炸宇宙模型、计算(数值)广义相对论、量子引力,等等。虽然广义相对论已被普遍接受,但是广义相对论还存在一些理论困难,例如,爱因斯坦引力场方程的许多严格解难以找到物理解释;广义相对论的量子化(量子引力)问题难以解决,等等。因此,物理学家对广义相对论的理论基础、重要预言和理论困难从理论与实验两个方面多年来进行了深入的探索,取得了长足的进展。

广义相对论有两个基本假设:广义协变原理和(局部)等效原理。

广义协变原理是说一切物理定律的方程式在广义时空坐标的任意变换下保持形式不变。我们把这个原理同狭义相对性原理做个比较:两者都是对构造动力学方程式添加的一种限制,即狭义相对性原理要求一切物理定律在洛伦兹变换下保持不变;广义协变原

理要求一切物理定律在广义坐标的任意变换下保持不变。但是洛伦兹变换是物理时空坐标的变换而广义坐标没有直接的物理意义;而且狭义相对性原理不引入任何相互作用力,但是广义协变性代表了引力效应。具体地说,广义协变的度规场方程就是引力的动力学方程;在没有引力存在的其他物质场方程变成广义协变的方程后也就纳入了引力效应。

等效原理是弱等效原理和强等效原理的统称。

弱等效原理:最早由伽利略发现,所以又称为伽利略等效原理,简单说是引力质量等于惯性质量。借助于牛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。质点在引力场中的自由落体加速度由牛顿万有引力定律和牛顿力学第二定律给出:

$$F=m_g g=m_i a \text{ 或 } a=(m_g/m_i) g, \quad (1)$$

其中  $m_i$  是惯性质量,  $g$  是引力加速度,  $m_g$  是引力质量(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)。

如果  $(m_g/m_i)$  是一个不依赖于质点物理性质的普适常数,那么弱等效原理的互为等价的不同表述是:

- (a) 适当地选取质量和重量的单位使常数  $(m_g/m_i)=1$ , 即弱等效原理可以表述为“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弱等效原理也可以表述为“一切物体无论它们的重量和材料如何,在给定的引力场  $g$  中都具有相同的自由落体加速度  $a$ ”;
- (c) 对方程(1)求解得到质点在引力场中的运动轨迹,所以弱等效原理又可以等价地表述成:只要给定初始位置和初始速度,那么一个不带电的质点在引力场中的运动轨迹就与它的物理性质(例如重量和材料等)无关。

狭义相对论给出了质量-能量关系式:  $E=m_i c^2$ , 其中  $m_i$  是惯性质量,  $c$  是真空光速,  $E$  可以是物质的内能、动能、总能量等;任何类型的能量  $E$  都有其相

# 纪念广义相对论创立 100 周年

应的惯性质量  $m_i$ 。不同的物质层次具有不同类型的相互作用力（例如，电子和原子核之间是电磁力；中子和质子之间是强力；等等），不同的力提供不同的势能。就是说，物质的总能量  $E$ （或相应的惯性质量  $m_i$ ）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，比例系数  $m_g/m_i$  可能会因物质材料的不同而不同；于是，具有不同材料的物质在引力场中可能会有不同的自由落体加速度。换句话说，不同的材料在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）之外的第五种基本力或其他形式的非基本的新力。因此，寻找弱等效原理的破坏也就是寻找新的作用力，其重要意义不言而喻。

弱等效原理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  $a_1$  和  $a_2$  的相对变化率  $\eta$ ：

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

其中用到了公式（1）。所谓伽利略在意大利比萨斜塔的实验没有文献记载。有文献记载的第一个实验是牛顿在 1686 年完成的。之后，出现了各种不同类型的实验。在这些实验中最值得一提的是厄阜（Eotvos）实验：在一个扭称横杆（该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，这两个物体受到指向地心的引力和地球自转产生的惯性力，如果  $(m_g/m_i) \neq 1$ ，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，这个力矩又将被悬丝的反方向力矩平衡。在横杆的取向转动 180 度后两个物体互换了位置，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。厄阜等人的观测结果给出  $\eta \leq 5 \times 10^{-9}$ ，即没有观测到偏转。宏观物体的弱等效原理实验见表 1；微观原子的弱等效原理实验见表 2。更高精度的实验检验将在空间卫星上进行，例如预计 2016 年发射的法国 MICROSCOPE 卫星，检验弱等效原理的精度设计为  $10^{-15}$ 。

强等效原理（爱因斯坦等效原理或说局部等效原理）：在宇宙中的任何局部引力场都不是均匀各向同性的。强等效原理是说在引力场中的任何时空点都

表 1 宏观物体的弱等效原理实验检验一览表

实验者	年代	精度	实验方法
Philippus	500 (?)	低	自由落体
Galileo	1590 (?)	?	自由落体
Newton	1686	$10^{-3}$	摆
Bessel	1832	$10^{-5}$	摆
Eotvos <i>et al.</i>	1922	$10^{-9}$	扭称
Potter	1923	$10^{-6}$	摆
Dicke, <i>et al.</i>	1964	$10^{-11}$	扭称
Braginskii, Panov	1972	$10^{-12}$	扭称
Keiser, Faller	1981	$10^{-10}$	流体支撑
Niebauer, <i>et al.</i>	1987	$10^{-10}$	自由落体
Adelberger	1990	$10^{-12}$	扭称
Williams, <i>et al.</i>	2004	$10^{-13}$	地-月激光测距
Schlaminger, <i>et al.</i>	2008	$10^{-13}$	转动扭称

表 2 微观原子的弱等效原理实验检验一览表

实验者	年代	精度	实验方法
Fray, <i>et al.</i>	2004	$10^{-7}$	冷原子干涉仪
Zhou, <i>et al.</i> (中国)*	2015	$10^{-8}$	冷原子干涉仪

\* L. Zhou et al., Test of Equivalence Principle at  $10^{-8}$  Level by a Dual-Species Double-Diffraction Raman Atom Interferometer, *Phys. Rev. Lett.* 115 (2015) 013004.

可以找到一个局部惯性系，在其中物理定律的形式与没有引力存在的狭义相对论的形式相同。这里的“局部”不能由数学定义而只能由实验仪器的观测精度来决定；这个“局部”要足够小，何谓“足够”，就是小到在其中的每个时空点观测仪器因其测量精度的限制而感受不到引力势梯度的存在（即观测不到引力效应）。落塔的自由落舱、高空气球的自由落舱、探空火箭、抛物线飞机、空间飞行器（例如空间站和卫星）等在一定的微重力水平上可以看作是“局部”惯性系。地球作为太阳的行星也是一个在太阳引力场中的自由落体，在忽略地球引力和转动的情况下也可以看作是局部惯性系。检验强等效原理的实验有 3 种类型：1) 弱等效原理的检验；2) 局部洛伦兹不变性的检验；3) 局部位置不变性的检验。首先，强等效原理之所以包含弱等效原理是因为局部惯性系无论是用何种材料建造的在引力场中都必须具有相同的自由落体加速度。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自由落体的“局部”惯性系，所以在地球实验室进行的电磁、弱、强相互作用实验获得的物

理定律都满足狭义相对性原理。但是这些定律的方程中都不存在引力效应，在这些方程中纳入引力效应的方法很简单，那就是把他们修改成广义协变的形式即可。第三类实验包括引力红移实验和非引力基本物理常数的普适性测量，这是检验在局部所做实验的结果与空间位置的无关性；非引力基本物理常数包括精细结构常数  $\alpha$ 、弱相互作用常数、强相互作用常数、电子-质子的质量比等，它们的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最好在宇宙的时间尺度进行，例如对遥远星系或类星体的光谱线与太阳系中的同位素丰度进行比较。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，1997 年韦伯 (M. Weber) 对 17 颗类星体光谱的分析给出的结果是早期宇宙的  $\alpha$  比今天的数值约小  $10^{-5}$  (若强等效原理成立  $\alpha$  应该不随时空而变化)；2001 年对类星体吸收谱的分析给出  $\Delta\alpha/\alpha = (-0.54 \pm 0.12) \times 10^{-5}$ 。但是 2004 年对原子光谱的分析没有发现  $\alpha$  随时间的变化而只是给出了一个上限，即这种相对变化如果有的话一定小于每年  $10^{-15}$ 。近来通过比对不同原子微波钟之间的相对频率给出  $\Delta\alpha/\alpha$  小于每年  $10^{-16}$ 。迄今为止不同的观测给出的结果并不一致也就不能定论，特别是遥远恒星能否看成局部惯性系以及那里的引力势对发射或吸收光谱影响程度的确定问题值得怀疑。因而需要进一步在“局部惯性系”确定  $\Delta\alpha/\alpha$ 。空间冷原子钟的计划预计精度会比地面提高一个量级。

在表 1 的实验中，所用物体都是实验室中的宏观物体（其引力自能太小），检验的是除引力以外的其他相互作用势能对等效原理的影响。要想检验引力自能的影响需要考虑天体的运动：如果引力自能造成等效原理破坏，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（在有的文献中把这种与引力自能相关的等效原理称为甚强等效原理，我们则把它纳入强等效原理）。这类检验的设想最早是牛顿提出的；到了 1825 年拉普拉斯通过研究“地-月”系统得到  $\eta < 2.9 \times 10^{-7}$ ；2004 年利用 30 年来地-月距离的激光测量数据获得： $\eta < 10^{-13}$ ，即在  $10^{-13}$  的精度上未发现（强和弱）等效原理破坏。

磁型引力场（引力磁场）效应：广义相对论的

引力场方程是引力势的非线性方程；在略去非线性项之后的线性化方程可以写成类似于麦克斯韦电磁场方程的形式，等等；而且检验质点的测地线方程在低速和弱场近似下可以写成电动力学洛伦兹力和牛顿力学第二定律的联合形式（其中计入了惯性质量与引力质量相等）；因此，广义相对论的引力场包含电型引力（其最低）和磁型引力（这是牛顿引力中所没有的），等等。磁型引力的研究始于 20 世纪 60 年代初。磁型引力效应很小因而难于观测。利用空间卫星观测这种效应的实验至今只有两个（参见表 3）：1）使用意大利-美国卫星 (LAGEOS-1 & 2) 通过激光测距观测其轨道的变化于 2004 年验证了磁型引力效应，精度是 10%；但是轨道的变化是电型引力和磁型引力两种效应的总和造成的，从观测数据中扣除电型引力效应的广义相对论理论值之后才得到磁型引力效应，所以不能说是对磁型引力效应的独立测量；2）美国的引力探测器 (GP-B) 实验（示意图见图 1）：超导陀螺在地球极轨道运行，初始时刻陀螺的自转轴指向远方的恒星，在运行中其自转轴的指向发生两种进动，一种进动发生在轨道平面之内称为时空弯曲效应（测地效应）的进动，实验值是  $-6601.8 \pm 18.3 \text{ mas/yr}$  ( $1 \text{ mas} = 4.848 \times 10^{-9} \text{ rad}$ ) 与  $-6606.1 \text{ mas/yr}$  的广义相对论预言值相符（精度为 0.28%）；另一种进动称为参考系拖曳效应（由地球自转引起的磁型引力效应），实验值是  $-37.2 \pm 7.2 \text{ mas/yr}$  与  $-39.2 \text{ mas/yr}$  的广义相对论预言值相符（精度是 19%）；这两种进动互相垂直直因而在数据分析中可以相互分离开来，所以这个实验检验的磁型引力效应独立于电型引力效应。其他的空间项目例如意大利的轨道高度为 1400 千米的卫星 LARES (LAsER Relativity Satellite) (2012~2016) 计划对磁型引力效应的检验精度达到 1%。

时钟变慢与引力红移：狭义相对论的运动时钟变慢正比于相对速度与真空光速比值的平方；广义相对论则预言处于强引力势的时钟比处于弱引力势的时钟走得慢（变慢的大小正比于两处的引力势差）；在飞机上的原子钟（1972 年使用铯原子钟和 1979 年使用铷原子钟）通过与地面原子钟比对读数验证了狭义和广义相对论的两种时间变慢的联合效应。这两种类型的时



# 纪念广义相对论创立 100 周年

钟变慢对光谱的影响是使其频率变小即波长变长（即光谱向红端移动，称为红移）；狭义相对论的红移可称为“速度红移”，而广义相对论的红移称为“引力红移”。最早检验引力红移的实验是测量恒星（包括太阳）光谱的红移，其精度较低而且由于恒星与地面之间的相对运动，牛顿经典物理的多普勒频移（是相对速度与光速之比的一阶效应）以及狭义相对论的速度红移（是二阶效应）会与引力红移混在一起。单独的速度红移实验和引力红移实验可以在地面实验室进行。速度红移的实验已经很多，全都证实了狭义相对论的预言。对于引力红移的实验验证，完成第一个精密测量的是邦德（Pound）等人于 1960 年完成的，他们使用的  $\gamma$  射线源是  $\text{Fe}^{57}$ ，吸收体与射线源之间的距离（即垂直于地面的高度）有十几米，利用穆斯堡尔效应观测吸收体接收到的  $\gamma$  射线频率与其发射频率的差值，结果在 1% 的精度内与引力红移的理论值相符；后来，还有一些更为精密的实验。至今的空间实验（探空火箭）精度只有  $7 \times 10^{-5}$ 。计划中的空间实验精度可达  $10^{-6}$  的量级。

引力波：如同麦克斯韦电磁理论预言了电磁辐射和电磁波一样，广义相对论预言了引力辐射和引力波（引力波是横波，在真空中以光速传播，引力辐射是四极辐射，引力子自旋为 2，静质量为零）。1966 年

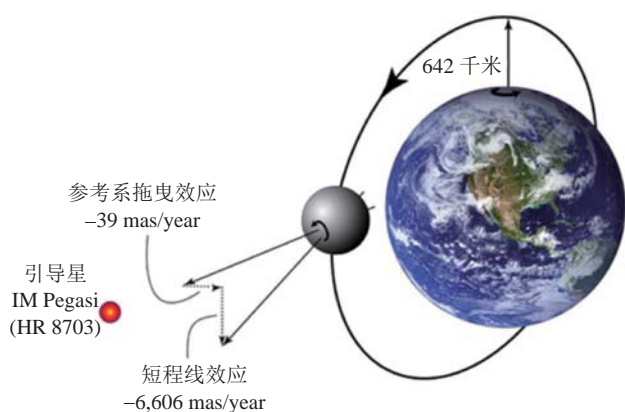


图 1 GP-B 实验示意图：2004 年发射，2011 年 5 月公布实验结果（参见 Everitt et al., Rev. Lett. 106, 221101 (2011)）

韦伯在实验室建造了世界上第一个引力波铝棒天线，他宣布观测到了引力波脉冲信号；可是后来其他更灵敏的装置并未发现类似的信号。但是韦伯的工作激发起物理学家纷纷建造引力波天线，然而所有这些探测均未成功，20 世纪 80 年代以后已不再继续这种研究了。宇宙中的双星系统由于引力辐射损失动能而使其轨道周期减慢。对这类系统进行的理论计算预言了双星系统的引力辐射功率；1974 年赫耳斯（Huls）和泰勒（Taylor）发现了脉冲双星 PSR1913+16 而且他们对这类系统的精确观测发现其轨道周期变化率与广义相对论的理论值极好地符合。为此他们荣获了 1993 年的诺贝尔物理学奖。这是引力辐射存在的间接证据（之所以叫“间接”是因为他们并没有对辐射出来的“物质”进行直接观测）。为了探测宇宙中不同波段的引力波，国际上已经或正在建造多个大型的地面和空间引力波探测装备（称为引力波天文台）以便直接探测引力波。

光线偏折（引力透镜）：光线在不均匀引力场中（特别是在大质量天体附近）的传播方向因受引力作用而改变。1919 年拍下的日全食照片显示太阳背后遥远的恒星位置因太阳引力而改变，其改变量与广义相对论的计算值基本相符；这是第一个被实验证实的广义相对论预言，这在当时引起了公众（包括物理学界）对广义相对论的强烈关注。接下来的几十年对多次日全食进行了类似的观测，结果也都与理论相符。20 世纪 70 年代，利用长基线和甚长基线干涉仪技术对射电波的引力偏折进行了精确测量，结果也都与理论相符。另外，如果在恒星与地球之间存在强大的引力源，光线偏折可以产生恒星的“像”，那么我们就看到的就不再是一颗恒星而是两颗（或两颗以上）相似的恒星（“引力海市蜃楼”）；这种强大的引力源被称为引力透镜。第一个引力透镜现象是在 1979 年发现的：在天空中有两个很靠近的类星体，它们具有完全一样的光谱，这两个类星体实际上是同一个类星体的两个

表 3 广义相对论的电型引力和磁型引力效应的实验验证

实验者	年代	精度	实验验证的效应	实验方法
Williams, et al.	1996	0.7%	太阳测地（电型引力）效应	月球激光测距
Ciufolini, et al.	2004	10%	磁型效应（扣除 GR 的测地效应）	地球卫星轨道激光测距
Everitt, et al.	2011	19%	地球磁型引力效应	陀螺自转轴指向的进动
Everitt, et al.	2011	0.28%	地球电型引力效应	陀螺自转轴指向的进动

“像”。后来发现这类“像”除了两个也有多个的；例如，1988 年发现有四个类星体的“像”，后来还找到了更多的“像”。星系也有引力透镜现象，由于星系的空间区域大，它的像不是点状的而是弧形的，甚至是个圆环（称为爱因斯坦环）。至今已经观察到很多“引力海市蜃楼”事例。造成“引力海市蜃楼”的“天体”（即引力透镜）有很多不同的候选者：不发光的巨大质量暗星、星系、黑洞、成团的暗物质系统等。

水星近日点进动：水星绕太阳运动是个椭圆轨道；由于太阳和水星不完全是球体以及其他行星的摄动等，水星绕太阳一圈不是 360 度，它离太阳最近的点（近日点）每转一圈就要向前移动一个微小角度；天文观测给出每百年进动  $1^{\circ}33'22''$ ；牛顿理论的计算值比这个观测值小  $43''$  每百年（1990 年新的更精确观测值给出的是  $42.98''$  每百年），这在相对论建立以前是一个困扰人们很久的未解之谜。广义相对论预言的数值与该观测值很好地符合。这类进动现象也发生在其他大行星和小行星上，只是水星的进动最大；用广义相对论算出的金星、地球以及小行星 Icarus 的理论值也与相应的观测值很好地符合。

雷达回波的时间延缓：在水星处于“上合”期间向水星发射雷达信号（这时雷达信号在传向水星的途中正好掠过太阳表面，因而受太阳引力的影响最大），然后接收来自水星的雷达反射信号；测量发现反射信号回到地球的时间比它不受太阳引力影响时的时间要晚，其观测结果与广义相对论的预言相符。

中子星：当一颗大质量的星体冷却下来而变得其内部压强支撑不住自身的引力时就会发生塌缩，最后成为完全由中子构成的星体，即中子星。中子星的体积小密度大；一个太阳质量的中子星其半径只有约十千米。1967 年发现了脉冲星（高速转动的中子星）。真实的中子星会有晶状的外壳、超流的核心、强大的磁场以及极高的自转速率。现在人们普遍认为，脉冲星的核心就是中子星；但是并不是所有的中子星都是脉冲星。

引力塌缩与黑洞：如果通过碰撞或吸引周围的物质之后中子星的质量超过 3 个左右的太阳质量（理论上给不出很确切的数值），那么就会发生引力塌缩，最终成为黑洞。黑洞不发光，边界是视界面（任何物质包括

光子只能从外部穿过视界面进入黑洞而不能从黑洞内跑出来）。在宇宙中，有不同类型的黑洞候选者；双星系统中的一员如果是黑洞，它本身虽然不发光，但是其周围物质形成的吸积盘中有物质落入黑洞就会产生 X 射线和气体喷注；另外，星系（包括我们银河系）的中心是超大质量的黑洞，其周围吸积盘也会产生 X 射线和气体喷注。天文观测已经给出了这类黑洞存在的许多证据。越来越多的天文观测表明大多数星系的中心都存在超大质量的黑洞。但是现在还不能以肯定的语气说黑洞已经被发现，除非天文观测能够确定它们的视界面。

黑洞热力学与霍金辐射：理论上广义相对论预言了几种类型的稳态黑洞：球对称黑洞、柱对称或轴对称（转动）黑洞；它们又分为带电的和不带电的。黑洞的质量、电荷、角动量之间所满足的关系与通常热力学的四个定律类似。由此认为稳态黑洞就是一个处于热平衡的热力学系统，所以可以定义黑洞的温度和熵。黑洞有温度就有热辐射而不应该是黑的；霍金把量子力学应用于黑洞表面（即它的视界面）附近而得出黑洞有辐射（霍金辐射）的结论；这就是说外面的观察者看到黑洞在不断地蒸发；黑洞越小，温度越高，蒸发得越快；小黑洞蒸发到最后会发生爆炸而产生高能量的  $\gamma$  射线暴。当然，以上这些理论结果还无法由实验或天文观测来证实。

大爆炸宇宙模型：以宇宙学原理（宇宙中的物质分布在  $10^8$  光年或更大的尺度上平均起来是均匀的和各向同性的）为基础在给定物态方程之后求解广义相对论的动力学方程得到宇宙的标度因子  $a(t)$ ；有三种类型的宇宙：闭宇宙、平坦宇宙、开宇宙；对于闭宇宙  $a(t)$  即是宇宙的半径。此外，如果把宇宙中的物质看成是理想的稀薄气体，则进一步得到宇宙标度因子  $a$ 、宇宙物质密度  $\rho$  及压强  $p$  与宇宙温度  $T$  的函数关系；进而得到温度与时间的关系；结果表明： $t \rightarrow 0$  时， $a \rightarrow 0$ ， $\rho \rightarrow \infty$ ， $p \rightarrow \infty$ ， $T \rightarrow \infty$ ，这是大爆炸起始时刻的极端情况，即宇宙从大爆炸开始。该模型预言的宇宙年龄、微波背景辐射、轻元素原初丰度被天文观测证实，因而大爆炸宇宙模型被广泛接受。但是它也存在许多困难：奇性困难（ $t=0$  时刻宇宙物质的密度、压强和温度都是无穷大，宇宙中的各种不同信息都无法分辨，而且能量无穷大更无法接受），解决这个困难

# 纪念广义相对论创立 100 周年

的方法之一是认为在普朗克 (Planck) 能标 ( $10^{19}\text{GeV}$ , 或大约在大爆炸起始时刻到  $10^{-43}$  秒) 宇宙处于量子状态。因此, 量子宇宙学 (宇宙波函数、虫洞等) 的研究成为重要的理论课题; 视界困难: 天文观测给出的宇宙 (观测宇宙) 的范围其尺度大约是  $10^{10}$  光年。但是, 在宇宙早期大爆炸模型给出的有因果联系的范围要比观测宇宙小很多很多; 此外, 大爆炸模型还有其他许多困难: 平坦性困难、物质和反物质的不对称性、星系的形成与演化等。20 世纪 80 年代初, 古斯 (Guth) 为解决视界困难和平坦性困难提出了暴涨模型, 其特点是: 熵增加、非热平衡过程、膨胀速度比标准模型的快很多 (即暴涨)。至今, 人们已经提出了种类繁多的暴涨模型, 其中大多数是引入一种或多种标量场来引发宇宙的暴涨。暴涨模型可以解决标准模型中除奇性困难之外的大多数困难。粗略地说, 宇宙开始是量子状态; 在  $10^{-43}$  秒之后成为经典宇宙其演化由大爆炸模型给出, 大约到  $10^{-32}$  秒进入暴涨过程 (不同的模型会给出不同的时间标度); 之后又成为大爆炸模型的演化过程: 先是辐射为主 (这时宇宙中的物质主要是光子和以接近光速运动的其他粒子), 以后转变成物质为主 (低速物质为主, 光子和其他高速粒子的比例很小; 今天的宇宙就是这种状态)。在宇宙中, 通常的物质大约只占 5%, 其余 95% 以上是暗物质。暗物质的候选者很多, 至今无法确定。暗能量是 1998 年发现宇宙在加速膨胀后给出的新词汇 (此后, 原来认为的 95% 以上的暗物质就分成了暗物质和暗能量; 它们不发光, 跟普通物质的相互作用很小; 暗物质可以成团, 例如构成星系或星系团的晕或说“大气层”, 暗物质也可以是自成体系的引力透镜等), 近些年的微波背景辐射探测卫星 (COBE、WMAP、PLANCK) 给出了各个宇宙学参数的精确数值因而宇宙学进入了精确宇宙学的新时代, 例如观测宇宙是平坦宇宙; 极早期经历了暴涨过程; 宇宙微波背景辐射与绝对温度为  $2.725\text{K}$  的黑体辐射相同, 温度各向异性的量级为  $10^{-5}$ ; 宇宙年龄是 138.2 亿年; 宇宙物质的成分是可见物质占 4.9%, 暗物质占 26.8%, 暗能量占 68.3%; 等等。但是暗物质和暗能量的本质以及由何种物质组成的问题已经成为理论和实验研究的重要前沿

课题; 在理论方面开展了大量的研究工作, 在实验方面已经和将要建造地面的、地下的以及空间的探测装置就是用来寻找它们的足迹。

计算 (数值) 广义相对论: 由于广义相对论的动力学方程组是高度非线性的, 对接近实际情况的物质体系的动态演化过程和引力塌缩是无法求出解析解的, 而只能使用大型的超级计算机或并行机做数值模拟运算。这项研究的重要性主要在于: 引力塌缩过程会产生引力辐射, 可以为引力波天文台提供有关引力波源和引力波构型的理论支持; 引力塌缩的最终结果可能形成黑洞, 这类研究又可以为黑洞的形成提供动力学依据。计算广义相对论还包含宇宙演化过程的数值模拟: 用计算机模拟通常物质、暗物质和暗能量各占一定比例的宇宙体系的演化过程, 研究宇宙中大尺度结构的形成, 从而展现宇宙早期的演化图像。

量子引力是指广义相对论的量子化理论。早已证明, 广义相对论的量子微扰理论不能重整化。因此, 多年来人们致力于广义相对论的非微扰量子理论的研究。由于数学上的困难, 至今未获成功。或许引力的量子化不能单独进行, 而应当与其他三种基本力 (电磁力、弱力、强力) 统一起来考虑。现在的大统一理论中最有希望获得成功的当属超弦理论。弦理论应用于宇宙学 (弦宇宙学) 的理论研究还在不断地深入地开展。但是, 弦理论中包含了非常多的新耦合常数、预言了太多的新型基本粒子, 在这些预言被实验证实之前, 我们就无法说它是成功的物理理论。

展望 21 世纪, 引力理论与引力实验的研究最有可能在下面几个主要方面取得重大进展或突破: 检验等效原理的空间计划将使精度提高几个量级, 新型的相互作用力有可能被发现; 随着大型的地面和空间引力波天文台的建成并已经或将要投入运行, 来自宇宙的引力波或其他未知信号有可能被探测到; 此外, 从地面 (包括地下) 到空间的探测暗物质和暗能量的大型观测装置也要逐步运转。所有这些研究既会带来应用技术上的一场革命, 也会使人类更深刻地认识宇宙, 同时又会对广义相对论和其他现有的基本理论提出挑战从而促成新理论的诞生; 此外, 量子引力和大统一理论在 21 世纪或许会以一种不同的方式取得成功。