

# 广义相对论的产生与发展

张元仲

中国科学院理论物理研究所, 北京 100080

**摘要** 首先简单扼要地评述了相对论(狭义相对论和广义相对论)的历史背景, 指出它是物理学发展的必然结果; 一些物理实验结果与牛顿理论的矛盾召唤着新理论的诞生; 为解决这些矛盾而对牛顿理论所做的大量修补工作为相对论的发现奠定了基础; 放弃旧的时空观、提出新的物理学原理使爱因斯坦最终建立了相对论. 主要部分是广泛而扼要地介绍并评述相对论的主要结果及其实验检验以及最新进展, 它们包括: 同时性定义、光速不变原理与相对性原理、时间变慢、长度收缩、质-速关系、质-能关系、因果律与超光速; 等效原理与广义协变原理、爱因斯坦引力场方程、测地线方程、广义相对论的线性化理论、引力红移、引力波、光线偏折与引力透镜、行星的近日点进动、雷达回波的延缓、中子星、引力塌缩与黑洞、大爆炸宇宙模型、引力能量问题、奇性定理、黑洞热力学与霍金辐射、量子引力等.

**关键词** 狭义相对论, 广义相对论, 宇宙学

## 1 引言

广义相对论<sup>[1]</sup>是爱因斯坦在1905年建立了狭义相对论<sup>[2]</sup>(平直时空理论)之后, 经过10年的不懈探索最终于1916年成功地建立起来的满足狭义相对论要求的引力理论(弯曲时空理论). 这个理论比牛顿万有引力定律和牛顿力学第二定律更为精确地描写了宇宙万物之间的引力相互作用规律; 对于引力较弱和物体运动速度较低的情况, 牛顿理论才与广义相对论近似一致. 或者说, 广义相对论不但能够描写低速运动和弱引力相互作用规律, 而且也能描写高速运动和强(引力)场现象; 具体地说, 广义相对论既解释了牛顿理论所不能完全解释的水星近日点进动, 而且预言了很多新的物理效应, 例如: 引力红移、光线偏折(引力透镜)、雷达回波的时间延缓、引力波、中子星、黑洞等等, 其中许多预言已被实验或天文观测所证实, 另外一些预言已经有了直接的或间接的证据<sup>[3,4]</sup>; 此外, 大爆炸宇宙模型是广义相对论对宇宙学的成功应用<sup>[3,5]</sup>. 虽然广义相对论已经被公认为比较精确地描写了引力相互作用规律, 但是由于它是一种弯曲时空理论, 因而存在理论本身的固有困难. 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. 本文将从狭义相对论和广义相对论的历史讲起, 然后概括地展示广义相对论发展的现状.

## 2 狭义相对论的建立及重要效应

1905年以前的实验研究已经显示, 如下3种类型的实验与牛顿经典物理学相矛盾: (1) 迈

克尔逊 - 莫雷 (转动干涉仪) 实验没有观测到地球相对于“以太”的运动; (2) 运动物体的电磁感应现象表现出相对性 (是磁体运动, 还是导体运动, 其效果一样); (3) 电子的惯性质量随电子运动速度的增加而变大。当时, 为了解释这些现象, 在牛顿力学的框架内引入了许多假设 (包括罗伦兹长度收缩假说和拉摩“时钟变慢”假说), 得到了与实验结果相符合的各种公式, 甚至得到了罗伦兹坐标变换。需要强调的是, 在所有这些公式之中全都包含真空光速。如果只为解释上面的实验现象, 那么上述这些公式和假说就已经足够了。但是这些公式和罗伦兹变换分别来自不同的假说或不同的模型而不是共同出自同一个物理理论。而且, 在使用牛顿绝对时空观来对罗伦兹变换以及所含的真空光速进行解释的时候却遇到了概念上的困难。这种不协调的状况预示着旧的物理观念即将向新的物理观念转变。其实, 著名的数学家、物理学家彭加勒早在 1905 年之前就已经意识到真空中的光速可能是个不变的极限速度。但是, 根深蒂固的旧物理观念阻止了他进一步追求新的物理学原理——光速不变原理。爱因斯坦洞察到解决这一问题的关键在于同时性的定义: 为了比较不同地点的时间, 必须事先使不同地点的时钟互相同步 (就是通常所说的“对钟”)。在牛顿 - 伽利略的惯性系 (即在其中惯性定律成立的那种坐标系) 中, 时间坐标如何实现在 1905 年以前并没有人研究过。但是, 定义牛顿 - 伽利略的时间坐标需使用瞬时传播信号 (从一点传播到其它点不需要花费时间), 或者把时钟从一点移动到其它点 (假定运动对时钟的速率没有影响)。然而, 在自然界中没有找到瞬时传播的信号, 传播最快的是光信号, 而光速是有限的; 另外, 没有证据显示时钟的速率不受运动的影响, 相反当时已经有了拉摩的“时钟变慢”假说。这就是说, 牛顿时空理论 (或伽利略坐标变换) 中的时间没有办法在自然界中精确地实现。用光信号“对钟”对于描写高速运动特别是电磁现象本身就会出问题。上面提到的与牛顿经典物理学相矛盾的那三种类型的实验涉及的就是电磁现象。所以, 爱因斯坦在 1905 年发表的第一篇狭义相对论的论文其题目是《论动体的电动力学》, 而且在第一节“同时性的定义”中就专门论述了为什么和怎么样“对钟”。爱因斯坦之所以能够建立狭义相对论就在于他首先放弃了牛顿的绝对时空观, 同时提出了光速不变原理用以定义同时性。如果我们既不知道牛顿物理学中的时间坐标为什么在自然界中不能实现, 又不知道在实际中为什么和怎么样“对钟”, 那么我们会固守牛顿的时空观而无法理解狭义相对论中的新效应。总结起来, (1) 狭义相对论的前提是惯性系, 不同的惯性系之间相对作匀速直线运动; (2) 狭义相对论的基础是光速不变原理和狭义相对性原理; (3) 狭义相对论可以给出上述用来解释与牛顿理论相矛盾的全部实验现象, 而且真空光速自然含在其中; (4) 狭义相对论的一切结论只是在惯性系中有效。

为了完整起见, 我在此简要解释一下狭义相对论的前提和主要的效应:

光速不变原理是说, 光在真空中的传播速度是个常数, 且与光源的运动无关。这个假定是用来“对钟”的。在此必须强调, 时至今日, 单向光速是否各向同性是无法用实验来检验的, 因而它只是个科学假设; 事实上, 理论研究表明<sup>[6~8]</sup>, 如果双程光速不变, 那么对单向光速做怎样的假定都不影响最后与实验进行比较的物理结果。狭义相对性原理是说, 在任何惯性系中观测物理定律所得到的方程式在形式上都一样。同时性的相对性是说在一个惯性系中的两个不同地点同时发生的两个物理事件在其它惯性系中看来不再是同时发生的; 狭义相对论中的许多佯谬都起源于同时性的这种相对性。时间变慢是说, 时钟的运动速度越快其走时速率越慢。物理学家由此设想人类在接近光速的飞船上由于增寿而可以到遥远的星际去旅行。长度收缩是说运动尺子的长度要比它静止时的长度短, 速度越快长度越短。需要强调, “测量”必须“同时”进行, 即同时记录其两端的坐标, 否则对一个运动的质点也会测出长度 (但这是它的轨迹)。质 - 速关系是指, 物体的惯性质量随着它的运动速度增加而变大。基本粒子高能加速器的建造因考虑了这种相对论效应才得以成功。质 - 能关系是指, 任何物质的能量都与它的惯性质量成正比, 比例系数是真空光速的平方。这是原子弹、氢弹、以及原子能发电的理论基础; 另外, 要把任何

有静止质量的物体加速到光速则需要无穷多的能量, 因此不可能有“光子火箭”; 任何以光速运动的物质(如光子)其静止质量一定是零. 另外, 狭义相对论和因果律排除了超光速信号存在的可能性. 以上所述两个基本原理和许多新的物理效应(除了单向光速不可测量外)都已经被大量的物理实验所证实<sup>[7,8]</sup>. 因而, 狭义相对论成了一切现代物理理论的基础.

### 3 广义相对论的建立及内容

在 1905 年以前, 物理学中的一切动力学理论, 例如牛顿力学、牛顿万有引力定律等, 都以牛顿绝对时空理论为基础. 既然狭义相对论比牛顿绝对时空理论更接近物理现象中的时空规律, 那么我们自然会想到: 必须修改这些经典理论使之满足狭义相对论的要求. 具体地说就是, 把这些理论中的动力学方程式(它们在伽利略坐标变换下保持形式不变)修改成在罗伦兹坐标变换下保持形式不变(这就满足了“狭义相对性原理”). 爱因斯坦(1905 年)在他的第一篇狭义相对论的论文中已经对牛顿力学第二定律完成了这种修改, 同时给出了真空中电磁场的变换形式, 因而也使真空中的电动力学(即真空中的麦克斯韦电磁场方程和罗伦兹力)得以满足狭义相对性原理; 后来, 闵柯夫斯基在 1908 年给出了满足狭义相对性原理的运动介质中的电动力学. 至此, 唯一迫切需要修改的另一个基本理论就是牛顿万有引力定律(当时还没有发现弱力和强力); 因为在狭义相对论问世之前很久, 用牛顿的万有引力定律和力学第二定律计算出来的水星近日点的进动数值比观测值每百年大约小 43 角秒, 这表明牛顿万有引力定律不够精确, 因而需要修改. 如果象修改牛顿力学第二定律那样, 仍然把时间和空间看做是平直的, 那么无论如何也不能把牛顿万有引力定律修改成满足狭义相对性原理的形式. 为此, 爱因斯坦借助于弯曲空间的黎曼几何才得以把牛顿引力定律推广成与狭义相对论相容的新型理论, 这就是 1916 年公布的广义相对论(一种弯曲时空的度规理论)<sup>[1]</sup>.

广义相对论的基本假设也是两个: 爱因斯坦等效原理和广义协变原理. 广义相对论的基本方程是

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -8\pi GT_{\mu\nu} \quad (1)$$

$$\frac{d^2x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\nu\sigma}^\mu \frac{dx^\nu}{d\tau} \frac{dx^\sigma}{d\tau} = 0 \quad (2)$$

其中  $G$  为牛顿引力常数, 四维时空度规  $g_{\mu\nu}$  可用四维时空中无限靠近的任意两点之间的间隔的平方  $ds^2$  来定义

$$ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu \quad (3)$$

$x^\mu$  ( $\mu = 0, 1, 2, 3$ ) 是时间坐标(零分量)和空间坐标(后 3 个分量);  $\Gamma_{\nu\sigma}^\mu$  是由  $g_{\mu\nu}$  及其对时空的一阶导数定义的克里斯托菲联络; 里契张量  $R_{\mu\nu}$  和曲率标量  $R$  中包含了  $g_{\mu\nu}$  及其一阶和二阶导数;  $\tau$  是个参数, 可以类比于牛顿力学中的轨道参数;  $T_{\mu\nu}$  是物质的能量-动量张量, 它的协变散度必须等于零

$$T_{\nu}^{\mu\nu} = 0 \quad (4)$$

#### 3.1 广义协变原理

广义协变原理可表述为: 物理方程在坐标的一般变换下其形式保持不变. 实际上这是等效原理的另一种表述. 坐标的一般(或说任意)变换既包含非惯性系(例如, 加速参考系、转动参考系)的变换, 也包含非物理的变换. 上述式(1), (2)和(4)都是广义协变的, 式(2)则是不变的, 此外, 其它的物理方程, 例如, 电动力学方程、弱和强相互作用方程也都必须是广义协变的, 它们在没有引力的情况下退化成为狭义相对论中的相应方程. 所以, 传统的观点认为: 广义相对论

中的时空坐标只是为了理论上处理问题方便而引入的纯数学符号，因而没有物理意义；任何可观测的物理量都应该是任意坐标变换下的不变量。我国著名的物理学家周培源和彭桓武教授对这种观点持不同意见，并且提出：谐合坐标应当是物理坐标<sup>[9,10]</sup>。对此，可以类比电动力学中的规范变换不变性：规范不变性使得电磁势不可观测和光子无静质量；如果实验发现了光子的静质量，这就意味着破坏了规范不变性。类似地，如果谐合坐标是物理坐标，那么，合理的引力理论应该含有广义协变性的破坏项。

### 3.2 爱因斯坦等效原理或强等效原理<sup>[11]</sup>

强等效原理是说，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势的不均匀性可以忽略不计；这样，这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）。强等效原理是爱因斯坦对弱等效原理（即伽利略等效原理）的一种推广，它自然包含了弱等效原理：电梯的引力质量与惯性质量之比是一个与电梯的重量和内部构造无关的普适常数（可以选取适当的重量单位使这个常数等于一），因为只有弱等效原理成立，这种“局部惯性系”才与电梯的重量和材料无关。弱等效原理的检验从伽利略和牛顿的时代到现在曾经进行过很多实验研究，精度愈来愈高，但都没有发现弱等效原理的破坏，见表1。

表 1

实验者	精度	实验方法
Philippus, 500 (?)	低	自由落体
Galileo, 1590 (?)	$10^{-2}$	自由落体
Newton, 1686	$10^{-3}$	摆
Bessel, 1832	$10^{-5}$	摆
Potter, 1923	$10^{-6}$	摆
Eotvos, 1922	$10^{-8}$	扭称
Dicke et al., 1964	$10^{-11}$	扭称
Braginskii, Panov, 1972	$10^{-12}$	扭称
Keiser & Faller, 1981	$10^{-10}$	流体支撑
Niebauer et al., 1987	$10^{-10}$	自由落体
Adelberger 1990	$10^{-12}$	扭称

### 3.3 牛顿近似（牛顿极限）

式(1)叫做爱因斯坦引力场方程，时空度规  $g_{\mu\nu}$  相当于引力势，对于弱引力场和物质低速运动的情况，式(1)近似为牛顿引力理论中引力势的泊松方程。

式(2)叫测地线（或短程线）方程，它表明，如果除了引力之外没有其它类型的力存在，那么任何检验物体（无论它们的重量和构造如何）在外部引力场中都沿同样类型的轨道运动。在弱引力场和低速运动近似下，式(2)成为牛顿理论中检验物体在引力场中的运动方程；这就是说，弱等效原理成立（“检验物体”是指在它的内部区域，外部引力势的梯度可以忽略不计，而且该物体对外部引力场的影响也可以忽略不计；因此，这里所说的“等效”实际上是“局部等效”）。

### 3.4 广义相对论的线性化理论

把度规写成  $g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$ ，其中  $\eta_{\mu\nu}$  是闵柯夫斯基（即平直空间）度规（也就是没有引力场的情况），因而  $h_{\mu\nu}$  就代表了引力的存在，将这样的度规代入式(1)，只保留  $h_{\mu\nu}$  的一阶导数项，那么式(1)就成了线性化的引力场方程，它可以被写成与麦克斯韦电磁场方程完全类似的形式；此时引力场分成了电型引力场和磁型引力场，它们是由  $T_{\mu\nu}$  中的物质密度（类似于电荷密度）和物质流密度（类似于电流密度）产生的；另外，测地线式(2)的线性化形式完全类似于电动力学中的洛伦兹电磁力的形式。从20世纪60、70年代以来，人们对这种线性化理论进行过大量的研究并建议了各种实验方案<sup>[12,13]</sup>，试图寻找磁型引力的效应，但是由于观测仪器还不够

精确, 至今还没有看到有关的实验结果的报道. 从对广义相对论的线性化形式的分析, 我们可以更清楚地了解广义相对论与牛顿理论及电动力学的差别: 牛顿引力只包含电型 (即库仑型) 引力, 广义相对论既包含电型引力也包含磁型引力, 而且还包含由  $h_{\mu\nu}$  的二阶以上的非线性项所代表的引力自相互作用, 所以, 广义相对论是一种 (高度) 非线性的理论 (麦克斯韦电动力学是一种不包含电磁场自相互作用的线性化理论).

#### 4 广义相对论的实验检验

爱因斯坦 (强) 等效原理的实验检验可以分为两种类型<sup>[4]</sup>: 局部罗伦兹不变性的检验和局部位不变性的检验. 第一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. 第二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<sup>[4]</sup>象狭义相对论中的多普勒效应一样本质上也是由时间变慢引起的. 广义相对论预言, 在静态的引力场中, 引力势强的地方的时钟比起引力势弱处的时钟走得更慢, 因而, 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). 广义相对论公布不久就有人试图测量来自白矮星的光谱线的移动, 但是并没有得到肯定的结论. 完成第一个精密测量的是 Pound, Rebka and Snider 于 1960 年在哈佛大学进行的, 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 (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% 的精度内与理论预言相符. 后来, 还有一些更为精密的实验, 其中最高精度的为  $10^{-6}$ . 另外, 直接把原子钟放在飞机上来与地面上的原子钟进行比较的实验是 1972 年 (使用铯钟) 和 1979 年 (使用铷钟) 完成的. 由于飞机相对于地面运动, 这类实验既包含狭义相对论的时间变慢效应, 也包含广义相对论的引力红移<sup>[7,8]</sup>. 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. 以前的观测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<sup>[14]</sup>, 这一新结果对等效原理有何影响还有待进一步研究. 另外, 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. 最近, 利用 30 年来地-月距离的激光测量数据也未发现等效原理的破坏<sup>[15]</sup>, 其精度是  $10^{-13}$ .

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, 实验由华中科技大学引力实验中心实施; 该项目属于中国科学院力学所国家微重力实验室主任胡文瑞院士主持的科技部攀 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<sup>[16~18]</sup>.

现在国外已有几个人型的检验弱等效原理的空间卫星计划, 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 (<http://einstein.stanford.edu/STEP/>), 该计划使用 SQUID 技术, 预计测量精度可以达到  $10^{-18}$ . 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. 相关的地面研究项目, 德国布莱梅大学的“应用空间技术及微重力中心”拟将类似的装置在 110m 的落塔上做自由落体实验, 精度好于  $10^{-12}$ .

**引力波** 如同麦克斯韦电磁理论预言电磁波一样, 广义相对论预言了引力波; 引力波的探测是物理学家长期而艰巨的重大任务. 1966年 J. Weber 在实验室用铝棒建造了世界上第一个引力波天线探测器并用来寻找引力波. 后来, 他曾经宣布两个相距很远的探测器同时接收到了来自宇宙间的引力波脉冲信号, 但是, 后来其他更灵敏的装置并未发现类似的信号<sup>[19]</sup>. Weber 的工作曾激发了美国、苏联、西欧国家、日本、中国等许多国家的物理学家的兴趣, 纷纷建立探测引力波的天线, 展开了寻找引力波的研究工作, 然而所有这些探测均未成功. 上世纪 80 年代以后已不再继续用实验室天线进行实验研究了.

宇宙中的双星由于引力辐射源损失动能而使它们的轨道周期增大. 人们曾对这类系统进行过许多理论计算 (其中包括我国著名理论物理学家胡宁教授 1947 年有关引力辐射阻尼的研究<sup>[20]</sup>), 预言了双星系统的引力辐射功率<sup>[4]</sup>. 1974 年 Huls 和 Taylor 发现了脉冲双星 PSR1913+16 并对该双星的轨道周期进行了多年的精确观测, 给出的轨道周期变化率与广义相对论的预言值极好地符合. 正是由于脉冲双星 PSR1913+16 的发现和轨道周期变化率的精确观测结果, 他们荣获了 1993 年的诺贝尔物理学奖. 这是引力波存在的间接证据.

为了探测来自宇宙的各种不同波段的引力波, 目前, 国际上已经或正在建造大型的地面和空间引力波天文台 (<http://www.ligo.caltech.edu/>, <http://lisa.jpl.nasa.gov/people.html>), 例如, 两组臂长为四公里的激光干涉仪 (LIGO) 业已初步完成, 三公里臂长的激光干涉仪 (VIRGO) 正在建造中. 空间引力波探测计划主要有 LISA (Laser Interferometer Space Antenna, 其臂长 500 万公里) 和激光天文动力学空间计划 (ASTROD: Astrodynamical Space Test of Relativity using Optical Devices).

**光线偏折 (引力透镜)** 光线在不均匀引力场中 (特别是在大质量物体附近) 的传播方向因其受引力作用而改变. 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场而改变, 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, 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<sup>[3]</sup>. 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效应进行了更为精确的测量, 结果也都与理论相符<sup>[4]</sup>.

另外, 如果在发光的天体与地球之间存在强大的引力源, 光线偏折效应可以产生该天体的“像”, 那么我们看到的不再是一个天体而是两个 (或两个以上) 相似的天体 (“引力海市蜃楼”); 这种强大的引力源被称为引力透镜 (<http://vela.astro.ulg.ac.be/themes/extragal/gravlens/>). 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; 研究表明, 所看到的这两个类星体实际上是同一个类星体的两个“像”. 后来发现, “像”除了两个以外, 也可有多个, 如, 1988 年发现有四个类星体的“引力海市蜃楼”, 后来还找到了包含更多个像的“引力海市蜃楼”. 除了类星体有引力海市蜃楼外, 星系也有. 不过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). 至今已观察到了很多“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, 例如, 不发光的大质量暗星、星系、黑洞、成团的暗物质系统等等, 也可能有微引力透镜.

**水星近日点进动** 水星绕太阳运动是个椭圆轨道, 由于其他原因 (例如, 太阳和水星不完全是球体、其他行星的摄动等等), 水星绕太阳走一圈不足  $360^\circ$ , 因而它离太阳最近的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, 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. 这类进动现象不只发生在水星轨道, 也发生在其它八大行星和小行星上, 只是水星的进动最大. 用广义相对论计算出的金星、地球以及小行星 Icarus 的数值也与相应的观测值很好地符合<sup>[3,4]</sup>.

**雷达回波的延缓** 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,因而受到太阳引力场的影响最大),然后接收来自水星的反射信号,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<sup>[3,4]</sup>.更精密的测量见文献[21].

**中子星** 当一颗大质量的星体冷却下来而使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.1939年,Oppenheimer和Wolkoff使用广义相对论对中子星的理论模型进行了研究.中子星的体积较小,密度极高;例如,一个太阳质量的中子星其半径约十公里(比太阳的半径大约小七万倍).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.

**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:例如,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)的中心似乎是超大质量的黑洞,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.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.

**陀螺自转轴的进动** 地球的自转所产生的引力作用会使卫星轨道上的陀螺自转轴围绕某一固定方向进动.为了检验这种效应,美国加州的斯坦福大学的研究组已经在Gravity-Probe-B(简称GP-B)的计划下工作了很多年(<http://einstein.stanford.edu/>),目的是在近期将一个含有四个超导陀螺装置的卫星发送到围绕地球的轨道上,观测陀螺自转轴的进动.

**大爆炸宇宙模型**<sup>[5]</sup> 以宇宙学原理(天文观测显示,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,在给定理想流体的物态方程之后,求解广义相对论的动力学式(1)和(4),就得到宇宙的标度因子 $R(t)$ 随时间的变化关系.存在三种类型的宇宙:闭宇宙、平坦宇宙、开宇宙.对于闭宇宙的情况, $R(t)$ 就是宇宙的半径.此外,如果把宇宙中的物质看成是理想的稀薄气体,则会进一步得到宇宙标度因子 $R$ 、宇宙物质密度 $\rho$ 和压强 $p$ 与宇宙温度 $T$ 的函数关系,进而也可得到温度与时间的关系.这种模型表明:在 $t \rightarrow 0$ 的初始时刻, $R \rightarrow 0, \rho \rightarrow \infty, p \rightarrow \infty, T \rightarrow \infty$ ,这是大爆炸起始时刻的极端情况,所以说宇宙是从大爆炸开始的.但是,这样的模型(称为标准宇宙模型)存在许多困难.例如,奇性困难:在 $t = 0$ 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,所以,这是一个必须解决的问题.解决这个困难的方法之一是认为,在Planck能标(大约 $10^{-43}$ s)之前,宇宙处于量子状态.因此,量子宇宙学(宇宙波函数、虫洞等等)的研究成为重要的理论课题.又如视界困难:天文观测给出的宇宙今天的范围(观测宇宙)其尺度大约是 $10^{10}$ 光年.但是,上述标准宇宙模型给出的有因果联系的范围要比观测宇宙小很多很多.另外,标准宇宙模型还有其它许多困难: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等.解决这些困难也是当前理论研究的重要任务.20世纪80年代初,Guth为解决视界困难和平坦性困难而提出了暴涨宇宙模型,其特点是,熵增加、非热平衡过程、膨胀速度比标准宇宙模型的快.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宇宙模型中除奇性困难之外的大多数困难.总起来说,宇宙开始是量子态,在 $10^{-43}$ s之后成为经典的宇宙(由上述标准宇宙模型给出的图象),紧接着进入暴涨过程,大约到 $10^{-32}$ s之后又成为标准宇宙模型的过程: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,光子和其它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 30%,其余的大部分是暗物质和暗能量.暗物质的候选者很多,至今无法确定;暗能量(宇宙常数)是近几年才由天文观测给出的,它已成为理论研究的重要前沿课题.大爆炸宇宙模型之所以被普遍接受,是因为它的下述几个主要预言与天文观测很好地符合:宇宙年龄、微波背景辐射、轻元素的原初丰度.

## 5 广义相对论的理论研究进展

### 5.1 数值广义相对论

由于广义相对论的动力学方程组(1)和(4)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平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,可以为上面提到的即将运转的引力波天文台提供有关引力源和引力波的理论支持;引力塌缩的最终结果可能形成黑洞,这类研究可以为黑洞的形成提供动力学依据.数值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.

广义相对论的上述几个方面的研究已经获得或将来有可能获得实验的直接或间接的证明.下面再简单介绍几个重要理论问题的研究情况,目前这些研究还只具有理论意义而无法用实验进行检验.

### 5.2 引力的能量问题<sup>[22,23]</sup>

在平直时空中,能量动量守恒定律是由物质的能量动量流的普通散度为零来表示的.但是在广义相对论中,式(4)是说物质能动张量的协变散度(而非普通散度)为 0,所以式(4)称为协变守恒律而不简单地叫做守恒律.按协变散度的定义,式(4)中除了普通散度项之外还会有其它项,所以,若把式(4)改写成普通散度为零的守恒方程形式,则需要定义引力场的能量动量张量(这是必要的,因为没有物质时也会有独立的引力波存在),这就是说,物质的能-动张量与引力场的能-动张量之和的普通散度为零.然而,这样定义的引力场能-动张量不是(真正的)张量而是赝张量,它在不同的坐标下会有不同的值,因而不是物理的可观测量.而且,这样定义的引力场能-动张量也不唯一.最早爱因斯坦给出过他的表达式.后来,朗道和栗弗席兹给出了不同的形式.胡宁教授也曾定义了另外的形式.所以,广义相对论中的能量问题始终是一个没有满意的答案而在不断研究的问题.段一士教授早在 20 世纪 60 年代曾提出使用标架表述来讨论引力的能量动量守恒律;另外, Penros, Hawking 和 Nester 等人曾先后分别研究过“准局域能量动量”的定义.但是,所有这些研究至今还没有获得普遍的认可.

### 5.3 正能定理<sup>[22]</sup>

一个孤立系统的总能量不能是负的(即能量的正定性),否则物理上不能接受.于是有人猜测,广义相对论中的孤立系统的总能量必定是正的,这被称为“正能猜想”.严格地证明“正能猜想”长期以来是理论研究中的重要而困难的课题.1981 年 Schoen 和丘成桐证明了 ADM 能量的正定性(正能定理),随后, Witten 以一种理论物理学家熟悉的方法重新进行了证明.

### 5.4 奇性定理

黑洞的内部存在奇点,若在一定的条件下星体塌缩的终点是黑洞,则奇性不可避免.上面已经提到,标准宇宙模型在起始点也出现奇性,这也是物理上不能接受而又不可避免的问题. Penros 和 Hawking(霍金)在 1965 年至 1970 年期间在一系列的论文中证明了:在合理的物理条

件(因果性条件、能量条件、等等)下,广义相对论给出的解一定包含时空的奇性(奇性定理)。

### 5.5 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。一个稳态黑洞的全部信息完全由它的质量、电荷、自转角动量这三个物理量决定,也就是说黑洞的其它信息全都丢失了(这称为“黑洞无毛定理”)。研究表明,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完全类似。由此,人们认为:稳态黑洞就是一个处于热平衡的热力学系统,可以定义黑洞的温度和熵。但是,有关黑洞熵的来源和定义仍是一个正在研究而未解决的问题。除了稳态黑洞外,人们也在研究动态黑洞。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)附近而得出黑洞有辐射(霍金辐射)的结论:在黑洞表面附近,强大的引力场会把真空量子涨落产生的虚粒子对中的正、负能量粒子分离得足够远(真空极化),其中的负能量粒子通过量子隧道落入黑洞,同时正能量粒子远离了黑洞(它们带走了黑洞的能量,这就是说,外面的观察者看到黑洞在不断地蒸发)。黑洞愈小,温度愈高,蒸发得愈快;小黑洞蒸发到最后会发生爆炸而产生高能量的射线暴。当然,以上这些理论结果还无法由实验或天文观测来证实。

### 5.6 量子引力

这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,至今进展不大。或许引力的量子化不能单独进行,而应当与其它三种基本力(电磁力、弱力、强力)统一一起来量子化。现在的大统一理论最有希望获得成功的当属超弦理论(更一般的理论叫M理论,它包含了各种不同类型的超弦理论),这是一个有限的理论。但是,这种理论中包含了非常多的新的耦合常数、预言了太多的新型基本粒子,在这些预言被实验证实之前,我们还无法说它是成功的物理理论。

## 6 展 望

展望21世纪,引力理论与引力实验的研究会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的实现,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投入使用,来自宇宙的引力波和其它未知的信号有可能被探测到,这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的演化,同时又会对广义相对论和其它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。

## 参 考 文 献

- 1 爱因斯坦 A. 广义相对论基础. 见: 爱因斯坦论著选编. 上海: 上海人民出版社, 1973. 36~74
- 2 爱因斯坦 A. 论动体的电动力学. 见: 爱因斯坦论著选编. 上海: 上海人民出版社, 1973. 1~22
- 3 温伯格 S. 引力论和宇宙论: 广义相对论的原理和应用. 邹稼隆等译. 北京: 科学出版社, 1980
- 4 Will C M. Theory and Experiment in Gravitational Physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1993
- 5 Kolb E W, Turner M S. The Early Universe. Redwood City: Addison-Wesley, 1990
- 6 Zhang Y Z. Test theories of special relativity. *Gen Relativ Grav*, 1995, 27(5): 475~493
- 7 Zhang Y Z. Special Relativity and its Experimental Foundations. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1998
- 8 张元仲. 狭义相对论实验基础. 北京: 科学出版社, 1994
- 9 Chou Pei-yuan. On the physical significance of coordinates and the solutions of the field equations in Einstein's

- theory of gravitation. *Scientia Sinica (Series A)*, 1982, XXV(6): 628~643
- 10 Chou Peiyuan. On the physical significance of coordinates and the harmonic condition in Einstein's theory of gravitation. In: Arima A, et al, eds. *Proceeding of the Asia Pacific Physics Conference*, Singapore, 1983
  - 11 张元仲. 等效原理的实验检验. *物理教学*, 2002, 24(9): 2~4
  - 12 Braginsky V B, Caves C M, Thorne K S. Laboratory experiments to test relativistic gravity. *Phys Rev D*, 1977, 15(8): 2047~2068
  - 13 Mashhoon B. Gravitational couplings of intrinsic spin. *Class Quantum Grav*, 2000, 17: 2399~2410
  - 14 Webb J K, et al. Further evidence for cosmological evolution of the fine structure constant. *Phys Rev Lett*, 2001, 87(9): 091301-1~091301-4
  - 15 Adelberger E G. Class. New tests of Einstein's equivalence principle and Newton's inverse-square law. *Quantum Grav*, 2001, 18(13): 2397~2405
  - 16 Zhang Y Z, Luo J, Nie Y X. Gravitational effects of rotating bodies. *Mod Phys Lett A*, 2001, 16(12): 789~794
  - 17 Luo J, Nie Y X, Zhang Y Z, Zhou Z B. Null result for equivalence principle of free-fall rotating gyroscope. *Phys Rev D*, 2002, 65(4): 042005-1~042005-6
  - 18 Zhou Z B, Luo J, Yan Q, Wu Z G, Zhang Y Z, Nie Y X. New upper limit from terrestrial equivalence principle test for extended rotating bodies. *Phys Rev D*, 2002, 66(2): 022002-1~022002-4
  - 19 Ohanian H C. *Gravitation and Spacetime*. W.W. Norton and Company Inc. 1976
  - 20 Hu N. Radiation damping in the general theory of relativity. *Proceedings of the Royal Irish Academy*, 1947, 51A: 87~111
  - 21 Krisher T P, Anderson J D, Taylor A H. Voyager 2 test of the radar time-delay effect. *Astrophys J*, 1991, 373(6): 665~670
  - 22 梁灿彬. *微分几何入门与广义相对论*. 北京: 北京师范大学出版社, 2002
  - 23 韦伯 J. *广义相对论与引力波*. 北京: 科学出版社, 1977

## HISTORY AND CONGRESS OF GENERAL RELATIVITY

Zhang Yuanzhong

Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China

**Abstract** In this review paper, I first give my comments on the history of the theory of relativity (special and general theories of relativity). It is shown that the discovery of the theory of relativity is an inevitable outcome of the progress in physics: The inconsistency between some experiments and Newton's theory had called for a new theory; Many studies of modifying Newton's theory to remove this inconsistency became the basic steps up to the theory of relativity; Discarded old concepts of spacetime and at the same times developed new physical principles brought Einstein to discover his theory of relativity. The main part of this paper widely and briefly review the main contents and progress in the theory of relativity and the main experimental tests. This paper deals with Einstein's definition of simultaneity, the principle of the constancy of the velocity of light and the principle of special relativity, time dilation, contraction of length, mass-velocity relation, mass-energy relation, causality and superluminal, the equivalence principle and the principle of general covariance, Einstein's gravitational field equations, geodesic equation, the linearized theory of general relativity, gravitational red-shift, gravitational waves, light deflection and gravitational lensing, planet's perihelion precession, the delay of radar echo, neutron stars, gravitational collapse and black holes, the big-bang cosmological model, gravitational energy problem, the singularity theorem, the thermodynamics of black hole and the Hawking radiation, and quantum gravity.

**Keywords** special relativity, general relativity, cosmology