

相对论、引力理论和宇宙学的发展

张元仲

中科院理论物理所

十九世纪末、二十世纪初，电磁学的很多实验与牛顿理论的矛盾很尖锐。为此，物理学家意识到牛顿理论存在的问题和新理论的必然产生。1905年，爱因斯坦以狭义相对性原理和光速不变原理为基础建立了狭义相对论（四维平直时空理论），该理论以惯性系之间的洛伦兹坐标变换代替牛顿理论中的伽利略变换，因而要求一切物理定律在洛伦兹坐标变换下保持不变（即“狭义相对性原理”）。

在1905年之前，物理学理论都是以牛顿绝对时间和空间的理论为基础的。既然狭义相对论比牛顿绝对时间和空间的理论更接近物理现象中的时空结构，那么我们就必须修改这些经典物理理论使之满足狭义相对论的要求。在爱因斯坦的第一篇狭义相对论的论文中已经把牛顿力学第二定律修改成了相对论性力学。而且还使真空中的电动力学满足了狭义相对性原理；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。另一方面，狭义相对论问世之前很久，用牛顿理论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。但是，如果仍然把时间和空间看作是平直的来修改牛顿万有引力定律的话则无法解释这43角秒。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理论推广成与狭义相对论相容的广义相对论（一种弯曲时空中的引力理论）并于1916年公布。此外，后来发现在微观粒子之间还存在弱相互作用和强相互作用，与之相应的理论是相对论性的现代基本粒子理论。

狭义相对论的许多直接预言已经有了很多实验验证，例如时钟变慢效应、长度收缩效应、惯性质量与运动速度的关系、能量与质量的关系、光子无静止质量等等。更高精度的卫星检验正在计划之中。另一类证据就是现代基本物理理论的成功。即广义相对论、量子电动力学、基本粒子理论等理论的成功也是狭义相对论的证据。狭义相对论在理论上一直没有什么新的发展。

等效原理是广义相对论的二个基本假设之一，其中包含了（伽利略）弱等效原理，即引力质量与惯性质量相等；从牛顿开始直至今天已经在不同技术条件下进行了很多检验。目前的最高精度的实验表明，二个不同材料物体在引力场中自

由下落的引力加速度的相对差别 $\Delta g / g$ 在 10^{-12} 到 10^{-13} 的精度上没有发现等效原理的破坏。更高精度的地面实验室实验由于技术上的困难已经很难实现了。因此，地球卫星上的等效原理实验已经准备了多年，例如法国的等效原理实验 MicroSCOPE 小卫星预计于 2010 年发射，设计精度 10^{-15} 。

广义相对论的直接实验检验也有很多，例如光频谱的引力红移、水星和其它行星近日点的进动、光线的传播方向在引力场中的偏折、雷达回波的时间延迟效应等等都被很多实验观测证实，但是在地面实验室提高精度也已经受到环境和技术的限制；所以人们开始设计空间的实验方案。广义相对论的另一类预言，例如中子星天体、引力透镜都已经被天文观测证实；星系核心的超重黑洞已经有了强有力的证据。

陀螺自转轴的进动： 广义相对论还预言，在卫星轨道上的陀螺自转轴的方向会相对于遥远的恒星方向产生进动。为了检验这种效应，美国于 2004 年 4 月 20 日发射的《引力探测器（GP-B）》卫星至今已经运行了四年多，测量数据的分析结果有待公布。

光线偏折和引力透镜： 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。这种效应已经被很多天文观测所证实。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**。第一个引力透镜现象是在 1979 年发现的。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像的“引力海市蜃楼”。由于星系的空间区域大，星系的像会呈弧形或圆环。至今已经观察到了很多“引力海市蜃楼”事例。

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。上世纪八十年代以后物理学家们的兴趣已经从实验室引力波天线探测器转移到大型的地面和空间探测装置。引力波存在的间接证据是，宇宙中的双星（中子星）由于引力辐射损失动能而使它们的轨道周期减慢；1974 年 Huls 和 Taylor 发现了脉冲双星 PSR1913+16；他们对该双星的轨道周期变慢进行的多年观测结果与广义相对论的预言值很好地符合。为此，他们荣获了 1993 年的诺贝尔物理学奖。为了探测来自宇宙的各种不同波段的引力波，近年来国际上已经或正在建造大型的地面和空间**引力波天文台**，例如，在意大利建造的（法国和意大利合作的）“Virgo”引力波探测仪；在美国路易斯安那州建立的二个臂长均为 4 公里的直

角激光干涉仪引力波观测站 (LIGO); 英德联合建在德国汉诺威的长 600 米的 GEO 项目; 建在日本东京附近长 300 米的 TAMA 项目; 在南半球的澳大利亚正在建造一个仅 80 米长的引力波探测器 (Perth)。以上这些引力波探测器构成了异地观测网络。此外, 欧洲和美国的联合项目——激光干涉空间天线 (LISA) 是由三颗卫星组成的三角形激光干涉仪, 其三角形的边长为 500 万公里, 可以探测低频率低强度的引力波。

黑洞是广义相对论预言的最为奇特的天体; 它不发光, 任何物质包括光子只能从外部进入黑洞而不能从黑洞逃逸。但是黑洞天体吸引周围物质而形成吸积盘, 由于其极强的引力场以及物质不断落入黑洞, 所以会产生 X 射线和气体喷注; 天文观测表明, 星系 (包括我们银河系) 的中心都存在一个超大质量的黑洞, 其周围吸积盘也产生 X 射线和气体喷注。最近, 在欧洲核子中心运行的大型强子对撞机 (LHC) 计划观测微观黑洞的存在。黑洞理论的研究一直是理论物理中的前沿热点课题。黑洞也存在四个热力学定律 (“黑洞热力学”)。1974 年, 霍金依据黑洞附近的量子场论发现黑洞会以热辐射的形式辐射出物质 (霍金辐射)。但是 “霍金辐射” 对普通天体大小的黑洞的影响微不足道。目前, 人们在理论方面重点研究的有关黑洞的问题包括黑洞形成和随后辐射的过程中信息丢失的问题、黑洞熵的统计自由度问题、全息原理等。

量子引力和超弦理论: 广义相对论作为一种经典场论同样需要量子化, 即建立起引力场的量子化理论, 即量子引力。但是由于理论上的困难迄今为止还没有成功发现这种理论 (包括圈量子引力理论仍在探索之中)。单独把引力场量子化或者把四种基本相互作用的大统一理论量子化是追求引力场量子化的不同途径。后者的研究产生了超弦理论 (包含了费米子和波色子之间的对称性)。

额外维度和膜宇宙: 我们的宇宙是 4 维时空 (3 维空间、1 维时间)。大统一理论的时间仍是一维的, 而空间的维数则大于 3 维; 这种超过 3 维的空间维度称为 “额外维度”。最早的高维理论是 5 维 (4 维空间和 1 维时间) 的卡鲁查-克莱因统一理论。自洽的超弦理论是 10 维的。值得一提的额外维度的模型是 1998 年的膜世界图像 (ADD 模型)。这个模型预言, 在亚毫米尺度上引力定律会偏离牛顿引力的反平方定律; 为此而进行的许多实验还没有观测到这种偏离。

宇宙学: 广义相对论给出的 (标准) 大爆炸宇宙模型所预言的宇宙年龄、宇宙微波背景辐射、轻元素的原初丰度等已经被天文观测证实。但是在理论上有很多困难, 例如 “奇性困难”、“平坦性困难”、“视界困难”、“大尺度结构和星系的

形成问题”等。从 1982 年开始发展起来的“暴涨宇宙学（即宇宙在极早期经历的极短时期的加速膨胀）”很好地解决了除“奇性困难”之外的其它困难。

近些年来，天文观测取得了一系列重大成果：1989 年发射的宇宙背景探测器（COBE）精密测量了宇宙微波背景辐射的黑体谱并发现其各向异性；1998 年对超新星的观测发现宇宙在加速膨胀，揭示了宇宙常数（后来称之为暗能量）的存在；2003 年以来利用威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）获得了宇宙微波背景辐射的更精确结果；斯隆数字巡天（SDSS）获得了对大尺度结构及超新星的精确观测；这些观测结果进一步支持了大爆炸宇宙学、以暗物质和暗能量为主导的暴涨宇宙模型，并开启了“精确宇宙学”时代的大门。现在知道，宇宙物质的组成图像是：普通物质约占 4%，暗物质约占 23%，暗能量约占 73%。

暗物质的研究长期以来都是物理学研究的热点课题，它是联系宇宙学和微观粒子物理的重要桥梁。暗物质不发光且与普通物质的相互作用非常微弱，只能通过它与普通物质的引力相互作用来感知它的存在。成团的暗物质可以成为引力透镜，所以引力透镜的观测已经在从星系到更大尺度上证实了暗物质的存在。组成暗物质的可能候选者很多，如冷气体、暗行星、冷却的白矮星、黑洞、中微子和其他的一些基本粒子等，但是至今没有定论。所以，在理论和实验两个方面研究和寻找暗物质仍然是今后物理学研究的热点。目前世界上已经建造或计划建造许多实验装置用来探测暗物质。随着灵敏度的不断提高，暗物质之谜必定会被揭开。

暗能量是近年宇宙学研究的一个里程碑性的重大成果；暗能量不成团（这与暗物质很不相同），在宇宙中几乎均匀分布。研究暗能量的本质成为新的物理理论和观测的重大课题，为此各种不同的暗能量模型应运而生，这些模型中的暗能量可以是宇宙常数，也可以是一种随时间缓慢变化的动力学场（如精质场）的能量。此外，还提出了 Phantom（幽灵场）、K-essence、Quintom、快子场以及修改广义相对论的高维空间理论和全息原理等。然而目前已知的暗能量候选者都还不能自然地解释暗能量问题。解决这一问题或许需要新的理论，这样的理论很可能是包括引力在内的各种相互作用统一的量子理论。这将是一场重大的物理学革命。