

霍金与量子宇宙论

吕增建 刘 燕

(焦作大学基础科学系 河南 454003)

一、霍金——宇宙之谜的探索者

史蒂芬·霍金 1942 年 1 月 8 日出生于英国的牛津,那一天刚好是伽利略逝世 300 周年纪念日。童年的霍金热衷于搞清楚一切事情的来龙去脉,他看到一件新奇的东西时总喜欢把它拆开,把每个零件的结构都弄明白——不过他往往很难再把它装回原样,因为他的手远不如头脑那样灵活,甚至写出来的字在班上也是出名的潦草。10 岁时他喜欢做模型飞机和轮船,喜欢设计复杂的游戏。13 岁左右就下决心将来要研究物理学和天文学。

1959 年他考到了自然科学的奖学金,顺利入读牛津大学,1962 年去剑桥大学攻读博士学位,研究宇宙学。不久他被诊断患上了“卢伽雷”病(肌萎缩性脊髓侧索硬化症),导致全身瘫痪。他勇敢地面对这次不幸,继续醉心研究宇宙学。20 世纪 70 年代,他和彭罗斯证明了著名的奇性定理,并以此获得 1978 年的爱因斯坦奖和 1988 年的沃尔夫物理奖。他还证明了黑洞的面积定理。1973 年首部著作《空时的大型结构》出版,1974 年宣布发现黑洞辐射,成为英国皇家学会最年轻的会员。1974 年以后他的研究转向量子引力论,1977 年被任命为剑桥大学引力物理学教授。1979 年担任剑桥大学有史以来最为崇高的教授职务,那是牛顿和狄拉克担任过的卢卡逊数学教授。1980 年他把主要精力转向量子宇宙论的研究。1985 年霍金又因肺炎进行了穿气管手术,此后,他完全不能说话,依靠安装在轮椅上的一个小对话机和语言合成器与人进行交谈,看书必须依靠一种翻书页的机器,读文献时需请人将每一页都摊在大桌子上,然后他驱动轮椅如蚕吃桑叶般地逐页阅读。1988 年他的代表作《时间简史》一出版即在全世界引起巨大反响。作为宇宙学无可争议的权威,霍金的研究成就和生平一直吸引着不少的科技工作者和热心于科学的人们。他研究大尺度的宇宙学和另一端的量子力学。他的目标是解决“第一推力”的问题,他的研究使上帝没有存身之处,但梵蒂冈教廷仍对他表示了敬意,教廷科学院选举霍金为该院院士,世俗的偏见和神学的权威,都不能阻

挡科学的透射力。

二、宇宙学的早期发展阶段

宇宙是广漠空间和其中存在的各种天体以及弥漫物质的总称。宇宙是物质世界,他处于不断的运动和发展之中。

早在公元前 340 年,亚里士多德就提出了地心学说的宇宙观,托勒密为这个地球为宇宙中心的宇宙观制成了一个宇宙学模型。而哥白尼摆脱了托勒密的宇宙模型,在 1543 年提出了日心说。开普勒从第谷的观测资料中总结了经验的行星三定律。牛顿对行星及地面上的物体运动作了整体的考察和研究提出了万有引力定律,建立了经典力学体系,同时奠定了天体力学研究的出发点,使人们认识到支配宇宙中天体运动的力是万有引力。直到 1917 年爱因斯坦率先把他的广义相对论应用于宇宙学的研究才正式揭开了科学宇宙学的序幕。

三、大爆炸宇宙模型

1924 年弗里德曼在广义相对论的框架下,从理论上论证了宇宙或者膨胀、或者收缩、而不会保持静止,哈勃在 1929 年发现谱线红移为弗里德曼的宇宙学模型提供了观测依据。哈勃定律描述了所有测到谱线的星系在大尺度规模上退行,距离愈远退行愈快,这表明整个宇宙不可能像人们后来所想象的那样处于静态,而实际上是处于膨胀的状态。宇宙膨胀的发现可以说是 20 世纪最伟大的智慧革命之一,宇宙既然是在膨胀,那么回过头来看,必定有一个时候整个宇宙都压缩在一个极小的范围里,密度极大,温度极高,必定在那个时候发生了一次“大爆炸”,启动了宇宙膨胀,这大约是在 150 亿年前。

在现代宇宙学中,应该说大爆炸宇宙学是较有影响的一种学说。根据大爆炸宇宙学的观点,大爆炸的整个过程是:在大爆炸后的一秒钟,宇宙的温度约为 100 亿度,物质密度也相当大,那时宇宙只有中子、质子、电子、光子和中微子等基本粒子形态的物质。因为整个体系不断膨胀,结果温度很快下降,当温度降到 10 亿度时,质子和中子合成氦核的反应开始,类似氢弹爆炸时发生的聚变过程迅速把氦核和更多的质子和中子相结合形成氦核,它包含二个质子和二个中子,还产生了少量的更重的元素锂和铍。另外还有重氢和其他元素,所余下的中子会衰变成质子,这正是通常氢原子的核。当温度进一步下降到 100 万度后,早期形成化学元素的过程结束,宇宙

间的物质主要是质子、电子、光子和一些比较轻的原子核。之后的 100 万年左右, 宇宙仅仅是继续膨胀, 当温度降低到几千度时, 电子和核子就开始结合形成稳定的原子, 光子不再被自由电子散射, 从此宇宙变成透明。宇宙作为整体, 继续膨胀变冷, 又过了几十亿年逐渐形成了千千万万个恒星。恒星的光和热是靠燃烧自己的核燃料提供的, 其后果是合成碳、氧、硅、铁这些早期宇宙条件下不能产生的重元素。在恒星生命即将结束时, 它以爆发的形式抛出含有重元素的气体 and 尘粒, 这些气体和尘粒是构成新一代恒星的原料。在一些恒星周围, 冷的气尘会逐渐形成大小不等的形形色色的天体, 成为我们今天看到的宇宙。大爆炸模型已被几个重要的观测事实所证明, 如: 天体年龄不超过“宇宙龄”、各种不同的天体上氦丰度大都为 30%、河外天体有系统的谱线红移。特别是大爆炸理论的创始人之一——伽莫夫在 1948 年有一惊人的预言: 宇宙的热的早期阶段的辐射(以光子的形式)今天应在周围存在, 但是其温度已被降低到只比绝对零度高几度。1965 年果然被彭齐亚斯和威尔逊在微波波段上探测到具有热辐射谱的微波背景辐射, 温度大约为 3K。这是大爆炸宇宙学模型令人信服的证据之一。

四、暴胀宇宙模型

宇宙大爆炸处是一个奇性的状态, 这大爆炸奇性从何而来就摆到了宇宙学家的面前。20 世纪 80 年代科学家们提出了暴胀宇宙模型。

在大爆炸的一瞬间, 不仅没有任何天体, 也没有粒子和辐射, 只有一种单纯而对称的真空状态以指数方式膨胀着, 称为“暴胀”。今天我们所知道的自然界中四种基本相互作用力, 即引力、强力、弱力、电磁力, 那时是不可区分的。随着宇宙的膨胀和降温, 真空发生了一系列相变, 力之间的对称性被破坏了, 在大爆炸的 10^{-44} 秒, 发生超统一相变, 引力作用首先分化出来, 但强、弱、电三种作用仍不可区分, 夸克和轻子可以互相转变; 到大爆炸 10^{-36} 秒, 大统一相变发生, 强作用同电、弱作用分离, 物质和反物质之间的不对称性开始出现; 10^{-10} 秒以后, 弱电相变发生, 弱作用和电磁作用分离, 于是完成了四种相互作用逐一分化出来的过程。到这个阶段, 宇宙间已具备了构成我们所熟悉的物理世界的最原始和最基本的素材和条件。

五、量子宇宙论

封闭的宇宙模型

在大统一破缺以后, 宇宙有一个按指数形式膨

胀的阶段, 由于这种“暴胀”和大爆炸导致了和今天观察到的宇宙大致相同的结果: 宇宙是非常平坦、均匀、各向同性的, 以及宇宙中物质分布的模式, 如星系团、星系、恒星和生命形式等。但这仍然没有解决宇宙是如何开始的。

在对黑洞问题的研究中, 霍金证明了黑洞的面积定理, 即随着时间的增加黑洞的面积不减。但在考虑黑洞附近的量子效应后, 霍金又指出, 黑洞会像黑体一样发出辐射, 其辐射的温度和黑洞质量成反比, 这样黑洞就会因辐射而慢慢变小, 而温度越变越高, 并以最后一刻的爆炸而告终。黑洞辐射的发现具有极其基本的意义, 它将引力、量子力学和统计力学统一在一起。

20 世纪 70 年代霍金和彭罗斯证明了一个奇点的定理, 如果广义相对论是正确的, 在很一般的条件下, 时空一定存在奇点, 最著名的奇点即是黑洞的奇点以及宇宙大爆炸处的奇点。在奇点处所有科学定律以及可预见性都失效。为了预言宇宙是如何开始的, 人们需要在时间开端处有效的科学定律。霍金认为经典理论已经不能很好地描述宇宙, 必须把量子引力论引入到研究宇宙的极早期阶段。量子论认为: 从原则上说不可能精确地测知任何一个物体在时空中的运动轨迹, 否则将与海森伯测不准原理相矛盾, 这样, 原则上就否定了进行精确时间、长度测量的可能性。定量而言, 时间、长度的测量不可能超越普朗克时间($t_p = 5.3908 \times 10^{-44} \text{s}$)、普朗克长度($l_p = 1.6161 \times 10^{-33} \text{cm}$)。人们是不可能观测到从体积为零、密度为无限大的奇点所产生的宇宙创生大爆炸景象的。霍金认为在量子力学中, 通常的科学定律有可能在任何地方都有效, 包括时间开端在内。不必针对奇点提出新的定律, 因为在量子理论中不需有任何奇点。霍金将量子力学和引力结合在一起的这一统一理论的特征是用费因曼的历史求和方法处理爱因斯坦的引力观, 为了避免求和的技术困难, 这些弯曲的时空必须采用欧几里德型。也就是, 时间是虚的, 并和空间的方向不可区分。因为在欧几里德时空中, 时间方向和空间方向是同等的, 所以时空只有有限的尺度, 而没有奇点作为它的边界或边缘。时空就像是地球的表面, 只不过多了两维、四维而已, 它有限、无界, 没有边缘。宇宙是完全自足的, 而不被任何外在于它的东西所影响, 这样它也就无须宇宙外的造物主来所为的第一推动了。它既不被创生, 也不被消灭。它就是存在。

天文观测的结果是建立宇宙模型的基本依据,是检验宇宙模型真伪的最终标准,也是发展宇宙模型理论的动力。虽然霍金的宇宙有限无界的思想仅仅是一个设想,但是宇宙无边界条件和量子力学中的不确定性原理可以解释我们在宇宙中看到的复杂的结构。无边界假设导致一个预言,即宇宙现在在每一方向的膨胀率几乎是相同的。这与微波背景辐射的观测相一致,它指出在任何方向具有几乎完全相同的强度,这是大爆炸的余辉。利用无边界条件,宇宙应该是从仅仅由不确定性原理所允许的最小可能的非一致性开始的,在宇宙经历快速膨胀后,初始的非均匀性被放大足以解释在我们周围观察到的结构的起源。1992年宇宙背景探险者卫星(COBE)首次检测到微波背景辐射随方向的非常微小的变化。这种非一致性随方向的变化方式是不是早期稠密的宇宙中随机的量子波动留下了这些特点呢?这似乎和暴胀模型以及无边界设想的预言相符合。

宇宙无边界设想是霍金量子宇宙论的一块基石,这个理论是一个自足的理论,即在原则上,按照科学定律我们便可以将宇宙中的一切都预言出来,这个无边界条件的量子宇宙论真正解决了第一推动问题。按照霍金的理论,宇宙的诞生是从一个欧氏空间向洛氏空间的量子转变,这就实现了无中生有的思想,宇宙是由无创生出来的:不仅仅是从真空中出来,而根本是从绝对的无中出来,因为在宇宙之外没有任何东西。这个欧氏空间是一个四维球,在四维球变成洛氏时空的最初阶段,时空是可由德西特度规来近似描述的暴胀阶段,然后由大爆炸模型来描写。这个被称作是封闭的宇宙模型。

开放的宇宙模型

宇宙空间究竟是有限无界的封闭型,还是无限无界的开放型,这要取决于当今宇宙物质密度产生的引力是否足以使宇宙的现有膨胀减缓,以至于使宇宙停止膨胀,最后再收缩回去。可是现今的天文观测,包括可见的物质以及由星系动力学推断的不可见物质(中微子, neutralino 和 axions)其密度总和仍不及使宇宙停止膨胀的 $1/10$, 如果再加上有可能的暗能量也不足 $1/3$, 可见无限膨胀下去的开放宇宙的可能性仍然会呈现在人们面前。

许多人曾尝试将霍金的封闭宇宙的量子论推广到开放的情况,但始终未能成功,1998年2月5日,霍金及图鲁克在他们的论文《没有假真空的开放暴胀》中将以前封闭宇宙的量子论推广到开放的情形。

非常确定地提出宇宙不会收缩,这样的演化是一个有始无终的过程。

六、对科学的贡献和启迪

杰出的贡献

霍金是当代最重要的广义相对论和宇宙论家,在20世纪下半叶,对人类的时空观和宇宙观进行了根本的变革。在经典物理的框架里,霍金证明了黑洞和大爆炸奇点的不可避免性,黑洞越变越大;但在量子物理的框架里,他又指出,黑洞因辐射而越变越小,大爆炸的奇点不但被量子效应所抹平,而且整个宇宙正是起始于此。从宇宙大爆炸的奇点到黑洞辐射机制,霍金对量子宇宙论的发展做出了杰出的贡献。他提出的黑洞辐射理论是对爱因斯坦理论的第一个重要突破。他的宇宙模型是一个无边界、有限的四维时空——不需要上帝的推动,宇宙的演化完全取决于物理定理,他解决了困扰人类几千年之久的宇宙从何而来的难题。他的黑洞蒸发理论和量子宇宙论不仅震动了自然科学界,并且对哲学和宗教也影响深远。他被誉为继爱因斯坦之后世界上最著名的科学思想家和最杰出的理论物理学家。患卢伽雷氏症使他被禁锢在一张轮椅上达30多年,他却身残志坚,克服残废之患而成为国际物理学界的超新星。他不能写、不能说、行动困难,而竟能在物理学上做出突出成就,因此倍受尊重。

启迪与思考

从亚里士多德的宇宙观到霍金的宇宙模型,生动地反映了人类在探索宇宙奥秘中获得的相对真理与绝对真理的辩证统一性。霍金力求把相对论与量子力学联系在一起,对宇宙学的发展产生了深远的影响,但是这并没有结束人类对宇宙的探索历史,而恰恰在启迪和激励着人们去更深入地探索宇宙的奥秘。在对宇宙的探索中,人们永远也找不到终极真理,只能无限地靠近它。

宇宙学历来是孕育新观念和新思想的摇篮,他的每一个成果都会对人类的传统产生震撼。霍金的思想异常活跃,他的黑洞辐射、虚时间在自然观上给人的启迪则尤为深刻。霍金是在一般人难以置信的艰难奋斗中,以非凡的想象力拓展了理论物理学的探索空间,成为世界公认的引力物理学巨人,他之所以能取得如此卓越的成就,其中最主要的原因之一是他具有优秀的科学品质、强烈的使命感、超人的毅力和极其坚强的意志。霍金的一生是人类意志力的记录,是科学精神创造的奇迹。