

九十年代是宇宙学的黄金时代

• 李顺祺 • 李新洲 •

暂时我们还只有一些不完备的规律,这些规律制约着宇宙在所有非极端情形下的行为。现在看来这些规律都只是某个有待我们发现的统一理论的一部分。我们正在不断地取得进展,可能到本世纪末我们就能找到这个理论。
——斯蒂芬·霍金

我们所居住的宇宙究竟是怎样的呢?这一问题从巴比伦、中国和希腊的古代起就一直在议论着。古代的哲人们用尽各种理论描绘出各种各样的宇宙图像。把宇宙问题作为一门学问来进行科学探讨是从文艺复兴时期开始的。到了20世纪,物理学以爱因斯坦的相对论和后来的量子力学的发展为基础,进入了飞跃发展的阶段。天文学从太阳系发展到银河系,实际上就逐渐以全宇宙为研究对象了。尽管如此,在50年代以前,不少严肃的科学家认为,花费很多时间去研究宇宙是根本不值得的。这种说法当时不无根据,因为那时还没有足够的研究基础。

可是,到了本世纪的后半叶,一切都起了戏剧性的变化。这两方面的原因:一是大量使用了射电望远镜,在观测上取得了很大进展;二是粒子物理学的飞速发展作为宇宙学送来了极好的礼品。现在,热大爆炸宇宙已作为自然科学在本世纪后半叶的四大成就之一(其余三大成就为地学的块板模型、生物学的双螺旋结构模型和粒子物理学的 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 规范模型)而被广泛接受。

目前的宇宙观测主要有下述七个结果。其一,宇宙的物质具有层次结构,恒星是这个结构的最小单位,大约 10^{11} 个恒星被引力结合在一起构成星系,大约 10^3 个星系又物理地联系在一起构成星系团;此外,尚有构成超星系团的迹象。其二,宇宙在 10^8 光年以上的大尺度上是各向同性的,宇宙物质的总平均密度 $\rho \sim 3.1 \times 10^{-27}$ 千克·米⁻³。其三,宇宙的年龄下限是 1.2×10^{10} 年。其四,宇宙在膨胀。其五,宇宙具有处于微波波段的背景辐射。其六,重子数和光子数之比为 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 。其七,宇宙中轻元素的丰度不能用恒星演化理论来解释。

基于上述观测事实,宇宙学家提出了三类称为弗里德曼类型的热大爆炸模型。第一类模型认为,星系之间现在的相互分离速度比较小,它们之间的引力最

终会使它们从相互分离转为相互接近,宇宙是先膨胀到某个最大尺寸然后再坍缩。第二类模型认为,星系之间现在的相互分离速度很大,它们之间的引力不足以使他们停下来,宇宙是永远膨胀的。第三类模型认为,星系之间相互分离的速度刚好能使宇宙不坍缩,原则上,我们可以通过比较宇宙现在的膨胀速率和现在的质量密度来决定我们的宇宙相应于哪一类型模型。目前,我们在宇宙中可以直接观测到的物质的质量是不足以使宇宙的膨胀停下来的。但是我们有间接证据表明宇宙中有更多的我们看不到的质量——暗物质的质量。暗物质是否能使宇宙膨胀停下来,现在还是一个没有解决的问题。

标准大爆炸模型与上述七个观测结果都相一致,这是一个了不起的成就。但是,当把标准大爆炸模型外推到宇宙温度 $T \gg 1 \text{ GeV}$ 时,还存在着一些疑难问题。首先是视界问题,设在初始时刻从 r_H 处放出的光子到达 $r=0$ 的时间为 t ,那末 $r=r_H$ 的球面就叫做 t 时刻的视界,因为 $r=0$ 处的观测者在 t 时刻不可能获得任何来自这个球面以外的信息。然而,计算表明,在大爆炸以后的 10^{-44} 秒的时刻,宇宙尺寸要比视界尺寸大28个数量级。也就是说,观测宇宙中的各个部分在宇宙早期是不能有因果联系的。那末宇宙在大尺度上的均匀性是如何造成的呢?这就是视界问题,也称为均匀性疑难。其次是平坦性问题,热大爆炸模型表明,早期宇宙是非常接近于平坦的。如果宇宙不是平坦的,那末为什么它在早期会表现出如此高度地接近平坦呢?进一步的理论分析表明,造成这一问题的关键是宇宙早期的总熵很大,因此平坦性问题也被称为熵的疑难。此外,还有磁单极等其他疑难问题。80年代初,人们开始试图利用大统一理论来解决这一系列的问题。基于大统一的相变机制,人们提出了早期宇宙的暴胀理论。在宇宙大爆炸以后的 10^{-36} 秒,介质的各种组分处于大统一状态,这时夸克和轻子可以自由

场转化;强作用、弱作用和电磁作用有相同的强度,介质的这种状态被称为对称相,这时介质的温度不低于 10^{11}GeV .当温度降低到 10^{11}GeV 以下时,夸克和轻子转化的可能性渐渐消失了;强作用的强度也开始明显地高于电磁作用和弱作用.更重要的是这时介质的对称破缺相的自由能比对称相的低.

将大统一理论应用于宇宙学,宇宙在甚早期的演化中必然要出现从对称相过渡到对称破缺相的相变.对称破缺相的自由能低于对称相的情况开始于 $T \approx 10^{11}\text{GeV}$,但相变却不能立即发生,因为相变需要穿过一个又宽又高的势垒.随着宇宙的膨胀,介质温度降低,所以介质首先进入过冷的对称相.在过冷阶段,介质粒子的能量密度随温度的四次方下降而逐渐变得可略去,于是介质的能量密度主要来自过冷对称相的真空能密度,它几乎是一个常数.如在大爆炸宇宙的动力学方程中略去曲率项,可以解出宇宙标度因子 $R \propto e^{Ht}$,宇宙温度 $T \propto e^{-Ht}$, H 为当时的哈勃参数值.

人们把这指数型的膨胀阶段叫做暴涨.在相变完成后,过冷对称相的真空能作为相变潜热而释放了,于是暴涨将终止,宇宙恢复正常的膨胀.同时巨大的相变潜热的放出导致宇宙总熵的急剧增加,相变结束后宇宙仍常规地以等熵形式膨胀,所以暴涨解决了熵的疑难,即平坦性问题.同时,按大统一模型计算可知 H 为 10^{34}秒^{-1} 量级,暴涨阶段的持续时间为 10^{-33} 秒以上,那末,今天观测宇宙在暴涨前的线度要比原来的估计小43个数量级.这样,它远小于当时视界的线度,即整个区域有因果性联系,视界疑难自动地消失了.此外,暴涨理论也解决了磁单极问题.

综上所述,具有暴涨机制的大爆炸模型已为宇宙学奠定了一个可靠的基础.然而关于宇宙的起源问题仍然没有得到最终的回答.事实上,按照标准模型,大约在150亿年前,宇宙有无限大的密度和温度.这种情况,数学家把它叫做奇点.我们知道经典物理依赖于物理定律(方程)和边界条件,奇点的情形很难给定合理的边界条件.任何合理的物理理论都不允许有奇点.奇点的出现则提醒物理学家必须重新考察原来的理论.

大爆炸宇宙学基于广义相对论,尽管后者是20世纪科学的最伟大成就之一,但它还没有把另一个伟大发现——量子力学的测不准原理考虑在内.物理学家普遍认为,广义相对论不能应用于微观尺度的宇宙中,在宇宙的极早期,适当的描述必须来自量子的宇宙论.

量子力学是在本世纪初建立起来的,这个理论通常用来描述像原子或粒子那样的很小的系统.本世纪初物理学存在着原子结构方面的困难.人们认为,电子绕着原子核作轨道运动,就像行星绕着太阳作轨道运动一样.经典理论预言,电子由于运动要辐射电磁波,电磁波要带走能量,从而引起电子作螺旋形运动直

到最后与核相撞.量子力学不允许有这样的行为,因为电子要与核发生碰撞,就必须同时有确定的位置和确定的动量,这样就违反了测不准原理.系统描述原子行为的量子动力学方程是薛定谔方程.那末,描述宇宙行为的量子动力学方程又是什么呢?要回答这个问题,我们先回过头来看标准宇宙模型,令人大吃一惊的是它和原子有着惊人的相似性(见表1).

表1 原子系统和宇宙系统的相似性

	原子	宇宙
系统	具有电磁作用的质子和电子	具有引力作用的物质
重要自由度	径向距离 $r(t)$	宇宙标度因子 $R(t)$
经典困难	$r(t)$ 变为零,产生奇点	$R(t)$ 变为零,产生奇点
量子尺度	玻尔半径 (10^{-10} 厘米)	普朗克长度 (10^{-33} 厘米)
方程	薛定谔方程	惠勒-德维特方程
新特征	量子起伏消除经典坍缩	量子起伏消除经典坍缩

量子力学用一系列的“量子定态”来描述原子.每个态由各种量子数来表征.物理学关心的是从一个态到另一个态的跃迁几率等信息.经典宇宙的奇点是标度因子为零.类似于量子力学,量子宇宙避免了这个奇点,因为把所有质量限制于一点就意味着产生无限大的量子引力起伏.因此,量子理论不允许标度因子小于普朗克长度 l_p (10^{-33} 厘米).简单说来,量子宇宙的行为就像用普朗克长度代替玻尔半径所得到的氢原子的行为那样.不过宇宙的量子力学方程要复杂得多,它是一个无穷维空间的变分方程——惠勒-德维特方程.

这个宇宙方程的边界条件是什么呢?霍金给出的一个答案是宇宙没有边界.由此仅仅用惠勒-德维特方程就可以描述宇宙了.霍金等人已经找到了多种四维量子宇宙模型的解.哈立维将霍金的方法应用到六维爱因斯坦-麦克斯韦理论.作者之一也将这一方法推广到无标度卡卢札-克莱茵宇宙、八维爱因斯坦-杨-米尔斯理论以及超弦宇宙.

在最近两年中,量子宇宙学引起了对时空拓扑结构的讨论,考虑时空的一个小的空间不连通部分,它本身组成一个闭的“婴儿宇宙”.从数学上可以证明,在冈可夫斯基类型的时空中是不允许有这样的空间不连通部分的,然而当考虑欧几里得时空流形时这个障碍便消失了,这是因为存在着量子隧道效应.说得确切些,婴儿宇宙是通过势垒贯穿诞生的,这与粒子从势阱逃逸的机制是完全相同的.

在量子隧道的欧几里得形式中,一个称为“跳跃”的运动方程起着重要的作用.一个系统从它的初始

南开大学数学所理论物理研究室简介

陈天崧

子课题,分别由科学院物理研究所,研究生院,科学院计算中心,北京大学,西北大学,复旦大学,兰州大学,科技大学和南开大学等单位负责。

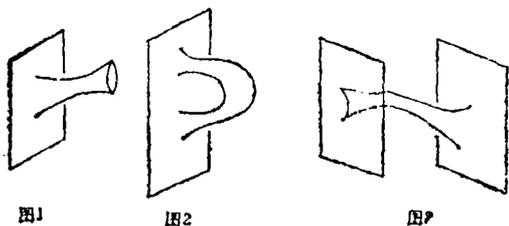
在陈省身教授、杨振宁教授提议下,南开大学数学所理论物理研究室于1986年6月筹建,由何国柱教授任代室主任,杨振宁教授担任数学所学术委员会委员,负责建立理论物理研究室。并拟定由十二位科学院研究所及一些高等院校有关专家组成组织委员会,负责安排研究室对外开放与学术活动。杨振宁教授亲自提出研究室初期的研究方向为“可积动力系统与一维、二维凝聚态模型”。本着“立足南开,面向全国,放眼世界”的精神,开展工作。

杨振宁教授应邀访问南开大学时,就明确提出:在中国发展物理学是十分重要的,基本理论物理在中国是较容易发展和取得成功的方向。基本理论物理的发展与数学常常发生密切的联系,而这些联系近十多年来有了惊人的突破性的发展,给物理、数学都带来了巨大的好处。他认为这样发展以后二十年间还会继续。他高度评价南开数学所的成功经验,提出充分利用现有条件,建立理论物理研究机构,大力促进数学与理论物理的结合,促进我国在这个领域出现创造性工作。

由杨振宁教授制定的研究方向——“可积动力系统与一维、二维凝聚态模型”项目,已被国家自然科学基金委员会列为特别项目,予以资助。项目包括六个

杨振宁教授为南开大学数学所理论物理室邀请专家讲学。1987年8月美国加州大学戴维斯分校的乔纳森教授应邀举办“可积动力系统”及“重整化群、混合及CP破坏”两个专题的学术报告会。乔教授做了十讲专题报告,系统地介绍及评价了这两个方向的研究工作。同年10月苏联科学院院士法捷耶夫应邀来讲学,对“量子反散射理论”作了系统深入的报告。1988年,围绕“共形场论及辫子群”这个当前国际上数学与理论物理前沿交叉研究领域中的热点,杨振宁教授又邀请美国芝加哥大学弗芮丹教授和日本名古屋大学河野博士来南开大学数学所作了系列报告。组织委员会还聘请国内熟悉此领域工作的学者先给大家作一些基础性介绍;在讲座进行过程中也请国内有关学者报告他们所做的研究工作,并一起讨论研究在这领域内急待解决的重大课题。1989年5月苏联著名科学家塔卡塔金及斯米尔诺夫应邀报告量子群及精确可解模型的区域算符矩阵元的计算等问题。

今后的几年中,南开大学数学所理论物理室还准备继续这样做下去。欢迎国内有关专家、学者及研究生踊跃参加这些学术交流活动并贡献一份力量。一起来办好这个开放研究室。



状态由隧道抵达这个态然而再回到初始态。图2显示了“跳跃”连接了图1的隧道事件。这个图看起来和惠勒及其合作者在多年前研究的蛀洞非常相似,所以就把“跳跃”称为“一个蛀洞”。当然,这两者是根本不同的,惠勒的蛀洞是满足初始条件的三维流形,而跳跃蛀洞是满足欧几里得场方程的四维流形。利用蛀洞对于轴的旋转不变假设,蛀洞的两端可以是彼此远离的,因而它又可以联系两个不同的平坦空间(见图3)。

霍金首先研究了纯引力的蛀洞,他发现只有将蛀洞限制在最小半径时,才能得到稳定的作用量。吉廷斯和斯特龙明格研究了与轴子耦合的引力理论,他们证明了在这种情况下,所有蛀洞的欧几里得作用量都

存在稳定点。由于这些概念的引入,引起了大量的研究。一些出人意料的结果被发现了,考尔曼等人声称,婴儿宇宙的引进导致每一个耦合常数都存在着一个真空参数,前者会被吸收到真空参数中重新定义。也许并不存在基本耦合常数,而只有真空参数。是不是耦合常数都可由动力学来决定呢?宇宙常数为零是否有动力学解释呢?这一连串激动人心的问题已经引起了众多的研究和激烈的争论。一种观点认为,在自由的、非相互作用的婴儿宇宙理论中,真空参数取任意值,并不是由动力学决定的,如果考虑相互作用的婴儿宇宙,真空参数是场算子的本征值,它们的值是由动力学决定的。这样一种理论描述了多相互作用宇宙系统,它是多相互作用粒子系统的形式发展。有人已把它称为“第三次量子化”理论,因为它的算子产生和湮灭单个宇宙的二次量子化态。二次量子化理论中的耦合常数是这个三次量子化场论的动力学场算子的本征值。

在漫长的历史进程中,我国的思想家对宇宙的理解是独特的,在中国的典籍中,留下了非常丰富的历史记录,至今仍具有重大价值。九十年代,我国的基础科学研究必将会又一次进入它的辉煌时期。