



# 现代宇宙学概述

李良

现代宇宙学是天文学和物理学的分支学科,它从整体角度研究宇宙的结构、运动和演化。事实上,自古以来人类对于宇宙的认识一方面依赖于观测和经验,另一方面依赖于思维和演绎推理。

宇宙,按其原来的字义就是空间和时间的意思。中国古代先哲提出“四方上下曰宇,经古来今曰宙”、“天圆如张盖,地方如棋局”以及“浑天如鸡子,地如鸡中黄”等概念,古代所讨论的宇宙,不外乎大地及其周围的天空。哥白尼冲破了宗教神学的阻挠,纠正了托勒密地心说的错误,建立了日心说,引起了天文学的巨大革命。但是,哥白尼时代所指的宇宙实质上是太阳系。

伽利略首先把望远镜指向了浩瀚的星空,结束了人类用肉眼观天的时代。人们原来看到的白茫茫的银河,竟是由亿万颗星星组成的庞大天体系统——银河系。牛顿的引力理论在研究一般天体(如行星、彗星)运行的问题上,理论与观测符合得很好。但是,在宇宙学上,牛顿提出了“绝对空间”和“绝对时间”的概念,他描述的空间是一个与物质无关的存放物质的容器,在这个无限大的容器中到处布满着天体,是一“动者恒动”、“静者恒静”的体系。由于牛顿受神学的影响,把空间和时间互相割裂,因此在宇宙学上陷入了困境。

1917年,爱因斯坦发表了著名论文——《用广义相对论对整个宇宙的考察》,拉开了现代宇宙学的帷幕。爱因斯坦这样写道,我们宇宙的行为类似于一个在各个部分

上是不规则弯曲的曲面,但是各处与一个平面相比又都没有明显的差别,即好像那微波荡漾的湖面。就其空间而言,这个宇宙是无限的。如果物质均匀地分布,那末宇宙必定是球形的(或者椭圆的),因为实际上,物质的细致分布是不均匀的,所以实在的宇宙在个别部分上将偏离球形,即宇宙将是准球形的,但它必然是有限的。在同一年,荷兰人德西特、俄国人弗里德曼于1922年、比利时人勒梅特于1927年也各自提出了不同的宇宙模型。在此期间,天文学家已认识到,在非常遥远的太空存在着许多个像我们银河系那样的星系。应当说明的是,现代宇宙学实际上包括密切联系的两个方面,即观测宇宙学和理论宇宙学。前者侧重于发现研究宇宙大尺度的观测特征,后者侧重于研究宇宙的运动学和动力学以及建立宇宙模型(时空结构和物质演化的理论描述)。

现代天文观测表明,宇宙在小尺度上,物质分布很不均匀,有行星及其卫星、小行星、彗星、恒星、星云、星团、星系、星系团等层次。随着尺度的增加,这种不均匀性却越来越小。由星系计数和宇宙射电源计数表明,在 $3 \times 10^4$ 光年以上时,这种成团性已为较好的均匀性所代替。“宇宙是有限的还是无限的?”这个问题并不是孤立的问题,而是与许多局部的天体物理现象有着密切的联系。以往人们对宇宙的描述,有点像佛经中记载的盲人摸象的故事,由于几个盲人没有综合出各自所描绘的局部方面,因而未能正确一致地描述整头大象。现代宇宙学家正是通过多种局部现象的观测结果,来判断研究哪一种宇宙模型更为合理。

天文学家利用光谱方法研究天体的物理性质已经有一百多年的历史了。每一种原子、分子或离子会发射特定波长的光线,这种光线称为它的特征谱线。从光谱中出现哪种特征谱线就可以判定天体中有哪种原

子、分子或离子。天体的光谱线向着光谱红端位移的现象称为红移。1868年,英国天文学家哈金斯测出了天狼星光谱中吸收线的微小红移,得知天狼星正以很大速度远离我们而去。这个速度现在被测定为每秒7.6公里。

美国天文学家斯莱弗于1912—1917年间,研究了15个星系的光谱线,结果发现有13个星系都在远离我们而去。1929年,美国另一位天文学家哈勃进一步发现,几乎所有的星系都有红移现象,而且红移量( $Z$ )与距离( $r$ )成正比。将红移量  $Z = \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e}$  ( $\lambda_0$  为观测

波长,  $\lambda_e$  为天体发射波长)折合成运动速度,可以用一个公式表示,即  $V = Hr$ , 这就是著名的“哈勃定律”,式中比例常数  $H$  称为哈勃常数,它的倒数与时间同量纲。最初  $H = 500$  公里/秒·百万秒差距,或  $H^{-1} \approx 2 \times 10^9$  年。

哈勃定律的确立表明,爱因斯坦、弗里德曼先后于1917年和1922年提出的“宇宙膨胀”预言是很有道理的。大部分星系远离我们而去的观测事实意味着宇宙确实在膨胀。有少数星系团属于“本星系群”,即由银河系、仙女座星系等几十个星系所构成的星系群,其中两星系由于引力作用,可以相互靠拢,因此看起来似乎朝着我们运动。

宇宙为什么会膨胀呢?现代许多宇宙学家认为,我们所观察到的宇宙是大约150—200亿年前宇宙大爆炸的产物。本世纪20年代,比利时天文学家勒梅特曾提出假说,他把当初那个包含我们的宇宙全部物质的原始天体称为“宇宙蛋”。由于这个大自然孵化的宇宙蛋猝然爆发,其碎片渐渐演变为星系。1948年,俄国出生的美国天体物理学家伽莫夫发展了勒梅特的理论,正式提出大爆炸宇宙论。

按照这种理论,“我们的宇宙”起源于最初的一次爆炸事件。那时的宇宙温度极高,约100亿度以上,密度极大而体积极小。在大爆炸发生时,物质四散飞出,宇宙间充满光子、电子和中微子等基本粒子,由于宇宙不断地膨胀,温度很快下降。当温度降到10亿度左右时,中子开始失去自由存在的条件,它或者衰变为质子和电子,或者和质子结合成氘、氦等原子核,化学元素开始形成。当温度下降到数千度时,辐射作用减退,气态物质逐渐凝聚成气云,此后进一步收缩成各种恒星体系,包括星系、恒星、行星(及卫星)及至生命的出现。计算表明,从大爆炸发生到现在,宇宙中天体的分布几乎是均匀的,宇宙残留的辐射温度降到 $3^{\circ}\text{K}$ 左右。

1965年,美国贝尔电话实验室的两位科学家——彭齐阿斯和威尔逊发现,在波长7.35厘米波长存在各向同性的微波辐射;后来在0.5毫米到70厘米波段内许多波长上进行的观测,表明该背景辐射具有黑体谱,是相当于 $2.74^{\circ}\text{K}$ 的黑体辐射。宇宙微波背景辐射的发现,使宇宙学家们受到极大的鼓舞。因为,这为各种宇宙模型提供了一个新判据,1978年,彭齐阿斯和威尔逊因此被授予诺贝尔物理学奖。

除了上述的河外天体谱线红移和宇宙微波背景辐射之外,还有两个观测事实有利于大爆炸宇宙论,一个是现在各种天体的年龄测定均小于200亿年;另一个是宇宙天体中的氦丰度(及氘)很高,氦元素在地球上很少,但在天体中氦丰度相当大,约占 $1/3$ 。按照大爆炸宇宙论,宇宙早期温度很高、密度很大,极易导致大量氦合成,伽莫夫曾推算,组成宇宙的质量25—30%为氦。尽管大爆炸宇宙学已成为现代最有影响的理论,它所能说明的观测事实也较多,但是它也存在一些困难问题,例如均匀性问题、奇点问题等。

1948年英国科学家邦迪、戈尔德和霍伊尔提出稳恒态宇宙学模型。他们认为,既然时空是统一的,宇宙物质的分布在空间是均匀的和各向同性的,因而在时间上也应是不变的,即所谓“完全宇宙学原理”。由于它所预言的星系分布情况和射电源计数均与实际不符,特别是1965年



微波背景辐射的发现,稳恒态宇宙学完全无法解释。六十年代以来,霍伊尔和纳里卡从马赫原理出发,提出了另一种引力理论和宇宙模型。这种理论认为星系谱线红移不是宇宙膨胀的结果,而是由于早

年的粒子有更低的质量所造成。1975年,霍伊尔企图进一步由此模型来解释 $3^{\circ}\text{K}$ 背景辐射,认为宇宙刚形成时由于粒子质量为零,背景辐射是它对星光散射所造成。

美国天文学家兹维基和法国天文学家伏库勒等人先后提出了等级式宇宙模型。他们否认宇宙中物质分布的均匀性,认为宇宙是逐级成团的,因为1938年兹维基发现了星系团的存在,伏库勒在五十年代提出了可能有超星系团存在的观测证据。这种理论所描述的宇宙犹如象牙雕刻球,一层套一层。这个模型对于其余的(即除星系团以外的)宇宙整体特征往往难于提供与观测定量的对证,它远远不如大爆炸宇宙学那样受到人们的关注。

大约在70年代初,美国加利福尼亚理工学院的桑德奇教授,在对天文学的有关资料进行详细分析后提出振荡宇宙模型。他认为,在每一振荡周期开始的时刻,全部宇宙物质都以基本的原子核粒子的形式处于极高的温度下,集中在一个很小的范围内,并发生一次爆炸(宇宙开始一次振荡循环),宇宙物质不停地向外飞散,这样持续数十亿年。逐渐地,宇宙物质的这种膨胀过程在物质引力的作用下开始变得缓慢起来,在此过程中,物质开始凝聚成恒星、星系及至行星等。桑德奇根据有关天文观测资料分析出,宇宙的膨胀过程从“大爆炸”算起,过600亿年便会完全停止下来。若果真如此的话,那时的宇宙在引力作用下便会收缩,即发生宇宙坍缩,最终会缩成高度集中的一团。接着,另一次爆炸又会发生……。这每一次振荡的周期大约为1200亿年。

为了解决大爆炸宇宙学存在的困难问题,从1980年起,美国物理学家古斯、温伯格等人提出了“暴胀宇宙”模型,它实际上是在粒子物理学中弱电统一理论的成就上建立的。暴胀宇宙模型基本上承认大爆炸为宇宙的生成时刻,而且对爆炸后最初约 $10^{10}$ 分之一秒内的情况该理论的解释与大爆炸理论相互吻合。这种理论认为,很可能宇宙的早期经历过一个暴胀阶段,即在很短的一瞬间,宇宙迅速膨胀到初始体积的大约 $10^{60}$ 倍,宇宙只是在后来才转而以目前所见的较为平和的速度膨胀。古斯认为,这种远远超过光速的膨胀过程可以被认为与许多物质在物理条件改变的情况下的相变类似。例如水过热急骤蒸发变成过热蒸气就是如此。

近年来,苏联物理学家安德烈·林德拓广了暴胀宇宙理论。他极力主张“宇宙”实际上是由无数个别的小宇宙组成的,小宇宙中的自然规律与我们这个宇宙迥然不同。林德提出的“紊乱”膨胀理论认为,宇宙的每一个别区域的膨胀是互不相同的,每一膨胀区域都生成自己的小宇宙。像当年我们的宇宙一样,无数小宇宙不断从时空结构中象气泡一样冒出来,形成永无

## · 物理信箱 ·

编者按：为了沟通读者、作者与编者之间的联系，解决广大读者、特别是青年朋友阅读本刊遇到的实际问题，特辟《物理信箱》栏目，希望得到您的支持与喜欢。

### 关于黑洞定义的复信

读者李键(山东省实验中学高三(3)班)来信：“90年第5期封面描绘了一幅壮丽的宇宙图景：黑洞与其伴星在太空中运动。黑洞大量地迅速地吞噬着伴星的物质。而本期中的一篇文章认为，黑洞做为物质的一种具体形态的引力子(姑且认为它存在)是不能发射出来的，因此不能与周围星体发生作用，这同封面上的内容矛盾，而现代天文观测证实黑洞确实能与其它星体作用。这又怎么解释呢？”

作者吴锋(武汉化工学院物理教研室)答复：“首先，应该指出：我在去年《现》刊第5期上给出的有关黑洞的‘通俗定义’，实际上是关于黑洞的一个‘初等定义’。它适用于经典黑洞。该定义强调‘黑洞’只吸收信号而不发射任何信号。由于信号的载体一般是物质，故‘黑洞’不允许任何物质从它的视界内逃逸出去。但在现代黑洞理论中，如果继续采用‘黑洞’的‘初等定义’，就会导致时空拓扑逻辑上的矛盾。因此，广义相对论中的黑洞，采用的是所谓的‘精确定义’。即：设 $M$ 为强渐近可预期时空，若 $M$ 不包含在 $J^-(j^+)$ 中，则说 $M$ 中包含黑洞。该 $M$ 中的黑洞区域 $B$ 定义为： $B = [M - J^-(j^+)]$ ，且 $M$ 中 $B$ 的边界 $H = j^-(j^+) \cap M$ 被称为视界。由于黑洞的‘精确定义’中涉及到许多‘时

终结的小宇宙生成过程。“宇宙”——所有小宇宙的总和——是永恒的，因为永远都有正在问世的新生世界。有趣的是，近年古斯与他的同事合作，致力于一个酷似林德理论的以“过渡区”为特性的理论说明。古斯认为，具有膨胀空间的气泡从外面看来象一个微小的黑洞，即一个密度之大甚至连光也不能逸出其引力范围的空间区域。气泡最不可思议的特征是，它在膨胀时并不挤占周围的任何空间，而是在一无所有的地方创造出新的空间。气泡或许会脱出我们的宇宙而形成自己的宇宙。

此外，近年来有些学者提出，在“大爆炸”后的瞬间，物质的高能状态下存在着一个统一场。并推测在大爆炸后的 $10^{-33}$ 秒左右，统一场中的冻结碎片便会形成纤细而重(10吨/厘米)的“宇宙弦”。这些宇宙弦

空拓扑学’方面的专门术语，深奥难懂，初学者不易理解。因而所有关于‘黑洞’的入门书籍或科普期刊，都用‘初等定义’来表述黑洞。这对于非‘引力理论’专业的广大读者来说，已经足够了。下面，我仍然采用‘初等定义’来解答你提出的问题。

一个具有引力质量的粒子，在其附近的空时区域中，会产生引力场。引力场是与产生它的‘源’同时存在的。粒子之间的引力作用就是通过引力场来传递的。引力场是一种特殊形态的物质。说它是‘物质’，是因为它具有能量和动量，可以用能量-动量张量来统一描述；说它‘特殊’，是因为它与实物粒子有许多不同的性质。

黑洞一般是由塌缩物质通过自引力塌缩形成的。在黑洞形成之前，塌缩物质的引力场就已经存在于时空之中；黑洞形成的过程之中中和之后，该引力场并未消失(场的时空分布可以发生变化)，这是因为产生该场的‘源’(塌缩物质)依然存在。由此可见，‘黑洞’及其附近空时区域的引力场，并不是由黑洞内‘发射’出来的‘新东西’，而是与塌缩物质共生同存的自场。塌缩物质与其引力场的演化规律，由爱因斯坦场方程统一描述。因此，‘黑洞’具有引力场与‘黑洞’的‘初等定义’并不矛盾。黑洞内塌缩物质可以借助这个场与其它星体物质发生强烈的相互作用，并且正是由于这个场，使得黑洞及其附近的时空成为极度弯曲的时空。由于你的信中没有提到引力辐射或引力波，所以我也避而不谈，以免涉及更专门、更深奥的其它物理知识。

在现代黑洞理论中，弯曲时空量子场论指出，由于真空涨落，‘黑洞’可以‘蒸发’(量子辐射)；可以从黑洞中提取能量等。如前所述，在现代理论中，关于黑洞必须采用‘精确定义’，否则会带来时空逻辑上的矛盾。”

都有极强的引力场，一个宇宙弦可在其周围形成星系，较大的弦圈可形成星系团。宇宙弦比其它理论模型较好地解释了人们今天所观察到的空洞、星系链和片状结构。

根据现代最有影响的大爆炸宇宙学，宇宙在热大爆炸过程中会产生大量的中微子，它们充斥于星系团之中，数量极为可观。有的宇宙学家认为，如果中微子确实有静止质量，我们的宇宙将会由膨胀转为收缩。即宇宙将经历一个从冷却而升温的阶段，最后将升至比现在的太阳温度还高很多的高温状态。

综上所述，现代宇宙学已涉及到基本粒子物理、天体物理、理论物理等多种学科，人们面临着许多根据现有知识体系所不能预见的问题，随着天文观测手段和理论认识的进展，人们对宇宙的认识将不断地深化。