

编者按：

2019年,国际天文学联合会(IAU)迎来成立100周年,为纪念这个划时代的事件,全球组织了贯穿一年的庆祝活动,庆祝活动的主题是“同一天空下”,通过宣传一个世纪以来的天文发现,增加公众对天文学作为一个工具在教育、发展以及对外交流方面的重要影响的认知。

这100年,是现代天文学蓬勃发展的100年。在100年前,人们还在使用照相底片来记录天文现象。在100年前,人们还不知道太阳的能源机制是什么。在100年前,利用日全食验证了广义相对论的光线偏折预言,但尚不知道广义相对论预言的黑洞在哪里。在100年前,很多人还认为银河系就是全宇宙,而太阳就在银河系的中心。而在100年后的今天,人类在深度和广度上全面更新了对宇宙的认识。

有鉴于此,《现代物理知识》编辑部组织“天文学百年”专题,以百年来天文学的发展,展现人类宇宙观的改变,表明天文学对人类文明进步的作用,以纪念IAU成立100年。

全新的宇宙

陈学雷

(中国科学院国家天文台 100101)

一、一百年前的宇宙

1919年是动荡不定的一年:俄罗斯的红军和白军在殊死战斗;巴黎和会各国代表们为了争夺利益而纵横捭阖。不过即便在这样的時候,也有一些人把眼光投向了天空。这一年国际天文联合会成立了,哈勃(Hubble)从军队退伍前往威尔逊山天文台报到,而两支英国天文学家的观测队伍则奔赴非洲和南美洲进行日食观测,这一观测最终导致广义相对论的新时空观被接受。

在此之前流行的是牛顿的绝对时间和空间理论,不过对于大部分人来说,时间和空间只是隐藏在潜意识里不言自明的概念,深入思索往往导致一些难以解决的矛盾,例如哲学家康德所指出的有限与无限的矛盾。非欧几何的可能性被数学家发现之后,有少数人如高斯、史瓦西(Karl Schwarzschild)等考虑了用观测数据检验空间几何,但其实并没有什么理由认为空间是非欧的,因此这种测量仅有某

种抽象的学术意义。哲学家马赫从经验主义哲学的基本原理出发,认定只有相对运动才是实验上所能够观测的,因此牛顿第一运动定律所说的“不受力的物体保持匀速直线运动”,并非如牛顿所说的相对于绝对空间而言,而是相对于大量遥远的恒星也就是宇宙物质的总体而言的。但是,这些差别在当时看来似乎只是学究气的咬文嚼字而已。

而宇宙中分布的物质又如何呢?这方面的思辨其实也相当困难。如果假定无穷的宇宙中均匀分布着恒星且恒星一直同样发光,虽然单个恒星的亮度按距离平方反比减小,但一个球壳中恒星的数目则随着球壳的半径平方增加,最后的结果是我们朝天空任一方向看去天空的亮度将是无限大,这与夜空是黑的相矛盾,这就是所谓奥尔伯斯佯谬。当然,这些物质是如何保持彼此静止的均匀分布同样让人困惑,万有引力有使物质彼此接近的趋势,但另一方面如果一开始有无限大均匀分布的物质,由对称性可知,其中任何一点各个方向受的引力是相

互抵消的因此将保持不动。不过,如果物质的分布有微小的不均匀性,那么这种不均匀性还是会打破对称性,物质将向附近空间中各个密度最大的地方聚集。也许,如康德和拉普拉斯所猜想的那样,这就是太阳系形成的过程。但是,宇宙整体怎么样呢?人们并没有很清晰的答案,有人猜测也许除了万有引力还存在万有斥力使物质达到平衡,但并无任何证据。

如果说关于宇宙的哲学思辨遇到了种种困难,天文学观测是否提供了什么实际的线索呢?人们知道太阳其实是一颗离我们最近的恒星,大量恒星分布在我们周围,共同构成了银河系。但银河系之外还有什么?一种旋涡状的星云尤其引人注目:这些旋涡星云中看不到单个的恒星,有些人认为它们其实是遥远的、与我们银河系类似的、由大量恒星组成的系统,但在当时这还是很有争议的猜想。1920年,两位天文学家柯蒂斯(Curtis)和沙普利(Shapley)举行了一场关于这一问题的辩论,双方各有论据,尚难以说服彼此。不过,另一位天文学家斯莱弗(Slipher)发现了一个关于旋涡星云有趣而难以解释的现象:他观测了十五个旋涡星云光谱,根据谱线的多普勒效应可以发现它们的运动速度达几百到几千千米每秒,远远高于几十千米每秒的恒星运动典型值,而且绝大部分旋涡星云的光谱都向红端移动,显示它们在远离我们。如果旋涡星云是随机运动的,那么它们应该有一半靠近一半远离,这些星云普遍离我们远去究竟说明了什么,颇让当时的学者们感到困惑。

二、现代宇宙学的诞生

1919年的日食观测结果证实了广义相对论理论的预言。广义相对论为研究时空与物质提供了一个基本的理论框架:时空的几何不是先验的,物质的分布可以影响时空几何,这样就有可能在一些合理的假设下讨论宇宙整体。爱因斯坦首先提出了有限静止宇宙模型:他假定空间满足正曲率的非欧几何,这样就可以避免空间无限性带来的矛盾。

但是,要获得一个静止解并不容易,牛顿万有引力换了一种形式仍然继续存在:由于物质的影响,一开始处于静止的有限空间将开始收缩并在有限时间内缩成一点。爱因斯坦于是引入了一个“宇宙学常数”,也就是相对论形式下的“万有斥力”,使它恰好与物质产生的万有引力相平衡。

此后,其他研究者开始用广义相对论研究宇宙学问题。荷兰天文学家德西特(de Sitter)研究了只包含宇宙学常数而没有物质的宇宙——物理上如果物质密度远小于宇宙学常数就可以这样近似,发现光在这种宇宙中会发生红移,这一结果令他困惑。俄罗斯数学家弗里德曼(Friedmann)研究了仅包括物质而没有宇宙学常数的宇宙,他发现这种情况下宇宙无法保持静止,而可以整体膨胀或收缩,并且物质密度与膨胀率一起决定了宇宙的几何:当宇宙平均密度高于某个由膨胀率决定的临界密度时宇宙空间曲率是正的(宇宙有限),如低于此则为负的,等于临界密度则是平直的。稍后比利时天文学家勒梅特(Le Maitre)得到了类似结果,不过,宇宙膨胀的概念并不容易理解,例如爱因斯坦虽然了解弗里德曼和勒梅特的工作,却一直认为这只是数学解而没有物理意义。

同一时期,哈勃在旋涡星云中发现了造父变星,此前女天文学家勒维特(Leavitt)已经发现,造父变星的光变周期与绝对亮度有关,因此可以作为一种天然的“标准烛光”测定距离。哈勃测量了旋涡星云的距离,发现它们确实远在银河系之外,后来这些被沙普利命名为星系。哈勃根据形状将观测到的星系分了类。他发现星系的红移与距离成正比,他与胡马森(Humason)测定了比例系数。勒梅特指出,如果宇宙膨胀则星系间距离不断增大,人们将看到绝大部分星系光谱有红移,且红移量与距离成正比,从而为哈勃的观测提供了物理解释。此后人们普遍接受了宇宙膨胀的观念。

如果宇宙膨胀,那么回溯过去,现在彼此相距遥远的星系在过去的某个时刻都处在同一点上,因此将具有非常大的密度。而且,如果没有其他热

源,气体膨胀时温度会降低,因此过去的宇宙温度更高。勒梅特和伽莫夫等人认为,宇宙就是这样起源于一个原始火球。后来,这个理论被称之为大爆炸理论。

英国天文学家邦迪(Bondi)、戈尔德(Gold)和霍伊尔(Hoyle)不喜欢这种宇宙突然创生出来的理论,因为很难回答在大爆炸之前的宇宙是什么的问题。而且,大爆炸宇宙论中宇宙的年龄是有限的,而根据当时测定的哈勃常数得到的宇宙年龄甚至比地球的年龄还短,这也是说不通的。因此,他们提出在宇宙膨胀过程中会有物质不断创生出来,但创生率很低因此并不容易被我们发现,而宇宙密度一直保持不变。这样的宇宙可以是永恒的,因此称为稳恒态宇宙理论。他们还进一步提出了“完美宇宙学原理”,即假定任一时刻的宇宙看上去都是相同的,这样就避免了“时间开始之前的宇宙是什么样的”这种令人困惑的问题。不过,20世纪50年代人们发现了亮度巨大的类星体和射电星系,因而可以在很高的红移上被观测到,而观测显示它们的分布并不满足完美宇宙学原理,而是随红移有明显的演化。不过,在一段时间内,大爆炸理论和稳恒态理论各有自己的拥趸。当然,也有不少人对这两种理论都不太相信,因为它们都建立在许多猜测和并不十分可靠的观测基础上。

三、大爆炸宇宙学理论

伽莫夫(Gamow)和他的学生阿尔弗(Alpher)、赫尔曼(Herman)等使用核物理理论推测宇宙大爆炸的过程。在早期宇宙温度非常高的情况下,由多个核子组成的原子核无法存在,核子主要以自由质子和中子的形式存在,可以通过核反应相互转化,二者的比例可用平衡态热力学计算。但是,随着温度下降,中微子退耦,二者相互转化的反应较慢,比例关系就偏离了热平衡值,中子数量“冻结”了,但自由中子仍可逐渐衰变为质子。当温度进一步下降时,通过核反应可以形成由多个核子组成的原子核。首先形成的是由一个质子和一个中子组成的

氘核,此后通过一连串核反应,逐步形成氦、氦3、氦4、锂等更重的核素。伽莫夫等一开始希望能用这种方式生产自然界中存在的各种原子核,但后来发现只有较轻的原子核可以在大爆炸中产生,而比锂更重的核素则是之后在恒星核燃烧或爆炸中产生的。这一理论很好的解释了为什么氢和氦分别约占宇宙重子物质的76%和24%,而其他所有核素所占比例很小。

如果宇宙早期处在这种高温的热平衡状态,那么除了核子与电子之外,宇宙早期也必然有大量光子,随着宇宙膨胀和进一步冷却,大爆炸核合成过程中形成的氦和氢核会进一步与自由电子复合成原子中性气体,而早期存在的这些光子却会一直存留下来,只是随着宇宙膨胀不断红移。阿尔弗等人估计,这些光子今天将红移到微波波段,形成一种宇宙微波背景辐射(CMB)。但是,在很长一段时间里,这一预言并未引起人们的重视。直到60年代初,迪克(Dicke)、威尔金森(Wilkinson)、皮伯斯(Peebles)等人才重新发现了这一点并开始试图探测这种大爆炸的余晖,不过在他们的观测开始之前,彭齐亚斯(Penzias)和威尔逊(Wilson)首先在测试贝尔实验室的一台射电望远镜时意外发现了一种天空中均匀分布的噪声,从而给出了大爆炸理论最有力的证据。虽然此后大爆炸宇宙理论此后成为主流理论,霍伊尔还没有完全认输,他指出,如果宇宙中分布着大量尘埃,而这些尘埃被宇宙中均匀分布的恒星星光加热,它们也可以辐射出一种均匀的红外辐射,再经过红移后形成温度均匀的微波背景辐射。不过,1990年,宇宙微波背景探索者(COBE)卫星的观测表明,CMB的频谱是几乎完美的黑体辐射谱,这是尘埃热辐射很难形成的,因此大爆炸理论得以进一步的确立。

在探索宇宙起源的同时人们也继续改进对宇宙膨胀的测量。第二次世界大战结束时,巴德(Baade)发现存在两种重元素含量不同的星族,而两种星族中造父变星的光变规律不同,哈勃原来在测量河外星系距离时不知道这一点,导致他给出的距

离尺度过小,相应的宇宙年龄也过短。做了这一改进后。哈勃去世后,他的助手桑得奇(Sandage)使用新投入使用的帕洛玛山5米望远镜继续改进观测,并提出了通过测量不同红移星系的距离给出宇宙膨胀的哈勃常数和宇宙膨胀加速度的方法。原则上,根据这些测量数据和弗里德曼方程可以决定宇宙模型究竟是哪一种。

四、星系形成和精确宇宙学

在宇宙学理论最初的研究中,人们常常假定宇宙是均匀且各向同性的,这个假定使理论研究大大简化。但是显然的是,宇宙并非完全均匀各向同性。星系内部的密度显然远远高于星系之间的空间的密度。星系的分布也不是完全均匀的,哈勃就已发现,星系的数密度呈现一种对数随机分布。兹维基(Zwicky)和阿贝尔(Abell)都发现,有些地方的星系密度特别高,形成星系团。1977年,第一个星系红移巡天——CfA红移巡天开始系统测量一个天区内星系的红移分布。根据哈勃定律,红移越大,距离越远,因此红移巡天可以给出星系的三维分布。在这种巡天中,人们发现星系会形成巨大的纤维状结构。为了定量描述星系的随机分布,也测量了星系密度的相关函数和功率谱等统计量。

显然,引力在结构形成中起了非常重要的作用,理论上可以采用微扰论研究原初扰动的演化。微扰论适用于相对密度扰动 $\delta \ll 1$ 的情况。这种情况下,扰动的演化方程是线性的,可以被分解为不同尺度的傅里叶模,每个模各自独立的演化。由于不同尺度的傅里叶模进入视界的时间不同,而宇宙膨胀经历了从辐射为主到物质为主的转换,还有声波振荡、中微子自由传播、光子自由传播等尺度效应,因此微波背景辐射在不同尺度上的涨落有明显的不同,这些体现为角功率谱上的一些特征。当扰动增长得较大、非线性效应不能忽略时,人们使用球形模型、泽多维奇(Zel'dovich)近似等方法获得了一些物理上的理解,而高速的计算机出现之后,N-体模拟、流体力学模拟等数值方法能够处理更加真

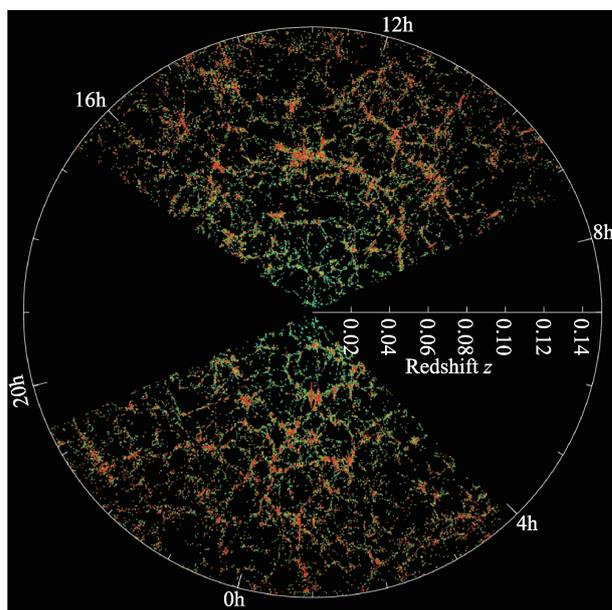


图1 SDSS 巡天观测的大尺度结构扇形图

实的情况。

这些研究的结果表明,微小的原初扰动在引力作用下持续增长,其中密度很高的区域,其宇宙膨胀将在局部引力作用下逆转为收缩。这些坍缩的物质最后形成由粒子速度弥散、气体压强或旋转与引力平衡的稳定天体,而其中的气体如果能够通过辐射冷却损失能量,就会进一步收缩,形成星系。星系内高密度的气体再进一步收缩最终形成恒星。在这一过程中,相邻的星系也有可能发生并和。人们基于原初扰动的功率谱和恒星形成、演化与反馈的经验规律可以构建星系形成的模型。这些模型给出的预言可以与观测数据进行定量化的比较。

自20世纪90年代以来,随着观测技术的快速进步,精确宇宙学的时代来临了。在宇宙微波背景辐射方面,COBE, WMAP和普朗克(Planck)三代卫星实验给出了非常精密的各向异性测量结果,在此之间还有一系列地面和气球实验。除了宇宙微波背景辐射实验外,多光纤光谱测量技术大大提升了红移巡天的效率。自2000年开始、并经过多次升级的斯隆数字巡天(SDSS)给出了对视亮度极限星系、亮红星系、发射线星系和类星体等样本的相当精确的测量结果。宇宙微波背景辐射及大尺度结

构的数据精度达到了百分之一的量级。这些理论与观测多方面的、非平凡的符合不仅为标准宇宙学理论提供了坚实的证据,而且也对宇宙学参数给出了很精确的测量结果。例如,根据宇宙微波背景辐射角功率谱中振荡峰的位置,确定了宇宙的几何是平直的。

绝大部分现有的观测都能被宇宙学常数冷暗物质模型LCDM很好地容纳。当然,在宇宙学研究中一直总是存在某些不同观测之间的冲突。例如,在很多年里人们使用不同方法得到的哈勃参数有显著的不同,其差异程度超过了这些测量名义上的统计误差。这些冲突有时是由于观测的系统误差,随着观测的改进,这些差异会减小或消失。在过去几年里,哈勃常数测量的误差显著减小了,但使用距离阶梯测得的值与宇宙微波背景辐射的拟合值之间的差异仍然持续存在,这仍是有待解决的问题。

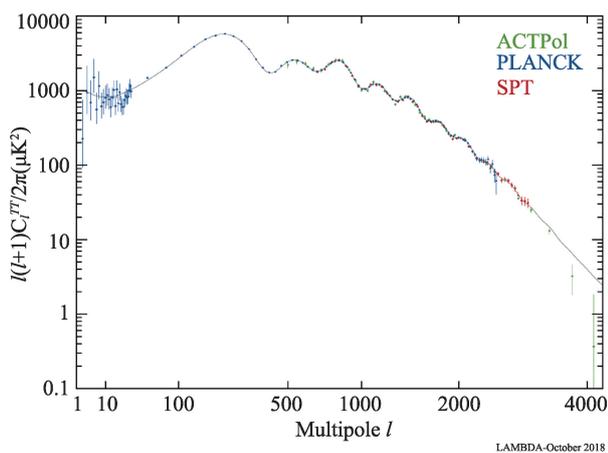


图2 宇宙微波背景辐射角功率谱

五、宇宙的起源和演化

宇宙学理论勾绘出了宇宙演化的历史图景。早期的宇宙处在很高的温度和密度下,其状态可以用现代粒子物理理论描述。随着宇宙膨胀冷却,形成了氢、氦等轻元素,但仍处于电离状态。在经过大约38万年的演化后宇宙中的等离子体复合,宇宙微波背景辐射光子开始自由传播,宇宙进入所谓的黑暗时代。这时,随着原初扰动在引力作用下逐渐增长,开始形成最初的非均匀结构。经过大约一亿

年演化后,第一代恒星开始形成,宇宙进入黎明时期。随着越来越多的恒星和星系形成,它们发射的光子将宇宙中的气体电离了。此后,更多的星系逐渐形成,同时一些星系也相互并和,直至演化为今日的宇宙。目前,人们已经能够通过望远镜直接观测到这一演化历程中的晚期部分。新一代的望远镜,如JWST,TMT等,试图观测宇宙早期的星系。同时,人们也正在开展实验,希望能探测到宇宙再电离、宇宙黎明甚至宇宙黑暗时代的中性氢产生的21 cm信号。

尽管大爆炸理论得到了观测的支持,但也存在一些问题。比如,按照弗里德曼方程,今天宇宙的密度与临界密度是同一个数量级的,这意味着宇宙早期的密度与临界密度的差别非常之小。为何如此?这就是所谓平坦问题。另外,广义相对论允许非均匀的宇宙,但不同方向的宇宙微波背景辐射温度相同,表明在宇宙早期这些不同点就很均匀了。在物理上,不同物体的相互作用可以使它们的压强和温度趋向相同,但是由于光速的限制,这种趋同的区域在宇宙早期应该很小,而观测却表明全天都具有相同的CMB温度。此外,在弱电相互作用统一理论建立之后,很多粒子物理学家开始考虑大统一理论。这些理论中往往预言存在着质量很大的磁单极子,在热大爆炸早期的高温下很容易产生非常大量的磁单极子,但观测中却显然并没有这么多。尽管这些问题并不直接与大爆炸

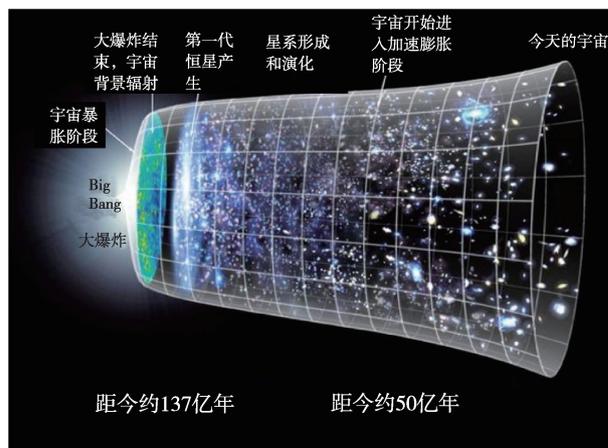


图3 宇宙历史

理论矛盾,但大爆炸理论却无法给出合理的解释。

在有标量场提供类似于形式类似宇宙学常数的真空能的情况下,宇宙可以加速膨胀。美国宇宙学家古思(Guth)首先意识到,如果宇宙极早期有一个他称之为暴胀(inflation)的极为短促但剧烈的加速膨胀过程,然后再转入通常的热大爆炸模型,上述问题就可以得到合理的解释:这时我们可观测的整个宇宙在极早期都曾经处在光速传播可以达到的范围之内,因此可以达到相同的密度。此后在暴胀过程中,大片区域的膨胀速度超过光速,把这些区域拉到非常大的尺度上,使我们以为它们是光速传播所不能达到的区域。在这一过程中宇宙的密度趋近临界密度,而磁单极子如果存在的话也会被这一轮剧烈膨胀所稀释。这一理论提出后很多宇宙学家迅速跟进,提出改进的理论。俄罗斯宇宙学家林德(Linde)认为,宇宙的暴胀可以在标量场的慢滚(slow roll)演化中实现,而如果标量场在空间各点的初始值随机分布,这些点就会形成持续时间长短不一的暴胀,这种“混沌暴胀”将形成一种在极大尺度上的分形,但我们可见的宇宙仅是其中一小部分,而其中的观测者看到的是均匀各向同性分布。

暴胀理论也提供了一种产生原处扰动的物理机制。在微小尺度上测不准原理导致的量子扰动随着宇宙快速膨胀而固化下来,并被拉长到巨大的宏观尺度。此前人们根据星系分布的统计特性,推测宇宙初始的密度扰动近似服从哈里斯-泽多维奇(Harrison-Zel'dovich)分布,即其功率谱满足幂律谱 $P(k) \sim k^n$,且 $n=1$ 。而在通常的慢滚暴胀中产生的原初扰动是近似满足高斯分布的随机扰动,扰动功率谱的指数接近但略小于1,这些都与现有的观测符合。此外,暴胀理论也预测原处引力波的存在,这原则上可以通过分析宇宙微波背景辐射的极化探测到。

当然,除了暴胀外,也有一些其他的宇宙起源模型,例如在火劫理论中,认为宇宙起源于高维空间两个“膜”的剧烈碰撞。或者,宇宙是循环的,多次发生膨胀、收缩,反弹等。由于观测资料的限制,

宇宙起源的研究仍有很大的难度。

六、暗物质、暗能量

20世纪30年代,在美国工作的瑞士天文学家茨维基(Fritz Zwicky)通过分析星系团观测数据,发现星系团中存在着大量不发光的“暗物质”。到了70年代,茹宾(Vera Rubin)等又发现,星系的恒星盘之外有由不发光暗物质组成的球形晕。人们很容易想到暗物质可能是某些不发光的的天体,如褐矮星、行星、小黑洞、碎石等。不过,通过各种观测人们已排除了这些普通物质组成的不发光天体作为暗物质主要成分的可能性。

现在,人们猜想暗物质可能是某些标准模型之外的未知粒子。不同的暗物质粒子对宇宙的结构形成有不同的影响。那些宇宙早期能够以接近光速运动的暗物质粒子被称为热暗物质,它们将抹平星系尺度的原初扰动,从而导致星系形成滞后。只有冷暗物质模型和温暗物质模型还有可能(温暗物质是指暗物质的运动速度远小于光速,但比冷暗物质还是高一些,因此可以抹掉小于星系尺度的一些涨落)。一类质量大于几个质子的质量、只参与万有引力和弱相互作用而不参与电磁相互作用和强相互作用的未知粒子可以很好的满足目前大部分天文观测,这被称为弱相互作用重粒子(WIMP)。许多超越标准模型的粒子物理理论,最典型的如超对称理论,可以自然地预言存在这样的粒子。人们利用被厚厚的地层或山体屏蔽的实验室进行WIMP搜寻实验,暗物质应该能够轻松穿过这些其他粒子无法透过的屏障,与深藏其中的灵敏探测器相互作用。我国锦屏山地下实验室的暗物质实验即是如此。这些实验已经相当灵敏,可以排除很多模型,但迄今为止,还没有发现暗物质。另一暗物质的热门候选者是轴子(axion)。这也是一种假想粒子,并不在粒子“标准模型”之中。它于20世纪70年代被提出,轴子与普通物质的相互作用也非常弱,而其质量要远低于WIMP。不过,轴子虽然很轻,但由于其产生时处于玻色-爱因斯坦凝聚

状态,因此其动量很小,仍然是一种冷暗物质。目前也有很多搜寻轴子的实验。同时,人们也继续进行精密的天文观测,试图根据暗物质的分布推断其性质;或者探寻暗物质可能的湮灭或衰变信号(例如悟空暗物质卫星实验)。

1998年,天文学家们发现宇宙的膨胀正在加速。一般我们所熟悉的物质,其对时空的影响都是使宇宙膨胀减速,因此这意味着宇宙中存在一种性质非常特殊的物质,被称之为暗能量。为了满足观测限制,暗能量也必须没有与普通物质以及光子的相互作用,或者这种作用非常微弱。暗能量比暗物质更难以直接研究,人们通过精密地测量宇宙膨胀速度和大尺度结构演化速度随时间的变化来了解暗能量的性质。

一些可能的暗能量模型包括爱因斯坦引入的宇宙学常数,或者某些性质非常特殊的标量场等。但是,为什么有这样的暗能量、它在整个物理体系中的起源仍然是未知的。

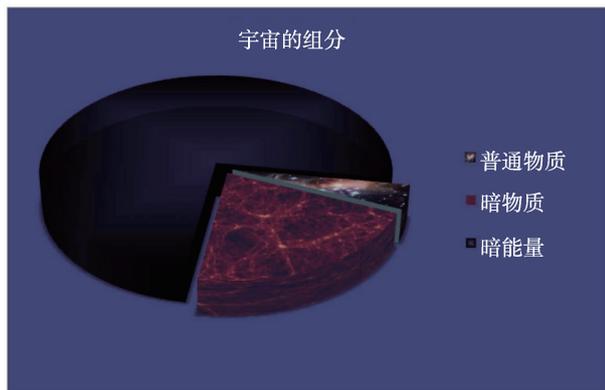


图4 宇宙组分

目前的观测发现,普通的已知物质只占宇宙总平均密度的4.7%左右,暗物质约占25%,暗能量约占70%。因此,可以说宇宙95%以上的物质组分仍然是未知的。目前,人们通过精密地进行宇宙微波背景辐射、大尺度结构、超新星、引力透镜等各种观测(未来可能还要加入引力波的测量),来进一步改进对宇宙模型参数的限制,并试图检验暗物质和暗

能量模型。

七、总结和展望

在过去的一百年中,宇宙学的研究取得了巨大的进步。在一百年之前,人们对于宇宙是什么样子还几乎毫无了解,更不清楚其演化的历史。一些基于看似合理的假设做出的初步思考几乎立刻就遇到理论上的矛盾,或者无法与观测相调和。

经过一百年的发展,我们已有充分的证据相信我们所处的可观测宇宙起源于大约138亿年前的大爆炸,并已建立了一个可以很好地描述其演化过程的理论模型,对于这一演化的大部分时段我们已有直接的观测,并且正在发展研究其早期演化的观测技术。我们仍然很难回答最早的时刻、甚至在大爆炸之前的宇宙是什么样子的,不过对大爆炸极早期我们已有了理论模型,能够较为自然地解释观测到的宇宙和原初扰动,但尚待进一步的检验。当然,受限于可观测的宇宙范围,这一研究是相当困难的。另外,在观测中我们发现,宇宙中绝大部分物质是我们仍不了解的暗物质和暗能量,宇宙的奥秘仍有待我们进一步的探索 and 发现。

