

编者按 国际天文学联合会(IAU)将 2009 年确定为国际天文年,以纪念 400 年前伽利略首次用望远镜观测星空这一壮举.天文学是历史最悠久的基础学科之一,对人类的文化产生着深刻的影响.物理学和天文学之间一直存在着根本性的联系,物理学家在研究物质世界的运动规律时必定会关注天体和宇宙,而天文学家又依据物理学家在地面实验中发现的规律去理解天体和宇宙的现象.为纪念国际天文年,《物理》特开辟国际天文年专栏,系列介绍相关研究的回顾和进展,以飨读者.

宇宙学这 80 年

俞允强[†]

(北京大学物理学院 北京 100871)

今年是国际天文年,又值 Hubble 发现宇宙膨胀 80 年和 Gamow 建立大爆炸理论 60 年¹⁾.后两件事正是宇宙学发展中极具里程碑意义的大事.在宇宙学已走向成熟的今天,回顾这 80 年历史,看到前一半的坎坎坷坷,后一半的曲曲折折,以及最终达到的惊人的成就,正应了 Einstein(见图 1)的一句感慨的话:关于世界,最不可理解的是它可以理解.

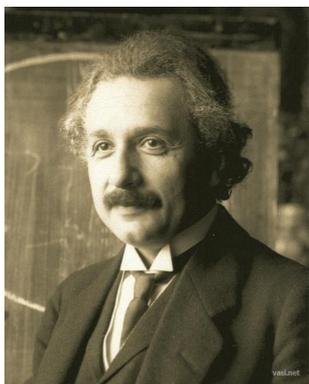


图 1 Einstein

1 巨大贡献有瑕疵

要讲现代宇宙学,1917 年 Einstein 提出静态模型是其发端.可是在不几年后,天文家 Slipher 发现了宇宙在膨胀的微弱迹象,敏感的 Einstein 立刻意识到他的模型应当放弃.尽管这样,他的发端性工作为后来的宇宙学奠定了两块不可磨灭的基石.其一是宇宙动力学服从广义相对论,其二是宇宙可简化为均匀介质.当时这两点都并没有事实基础,而只是猜测性的假设.1922 年, Friedmann 在同样的前提下建立了膨胀的动力学方程.它至今仍是研究宇宙膨胀过程的基础.值得指出两点:一是他沿用了 Einstein 的没有事实根据的假定;二是当时也还没有宇宙在膨胀的确切证据.因此当时它仅是一个试探性的理论模型.

1929 年, Hubble(见图 2)用他出色的观测得出了后来被称为 Hubble 定律的经验规律.他说其他星系在向远离我们的方向运动,其速度与距离成正比.尽管宇宙服从广义相对论,即时空是弯曲的,但在不十分大的范围里,三维空间的欧氏几何仍是好

的近似.这样可看到, Hubble 定律蕴含着两个很深刻的暗示(其实是推论).首先,用欧氏几何可推知,这规律对我们银河系的观测者成立,那么对任一星系中的观测者都会成立.现在把这一道理叫宇宙哥白尼原理,即我们在宇宙中完全没有特殊地位;再则是同样可以证明,这是宇宙能保持其均匀性的唯一膨胀方式.这两点对 Einstein 的简化假设都是一种暗示性的支持.



图 2 Hubble

开创宇宙学确实不是等闲的事.杰出的理论家 Einstein 对此作出巨大贡献的同时栽了一跤——假定宇宙是静态的.杰出的天文观测家 Hubble 也一样.在作出巨大贡献的同时犯了个不小的错误.在他发现的膨胀规律中把速度与距离之间的比例系数

(即 Hubble 常数 H_0)定下来是顺理成章的事.不几年后,他发表的值是 $H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$.按动力学理论一推算,这意味着今天的宇宙年龄约是 20 亿年.当时已经知道,地球的年龄是 45 亿年.地球诞生在宇宙之前,这当然是不能接受的结果.对于新开创的宇宙学,这错误造成了重大影响.要是理论的前提缺乏事实根据,而其推论又显然与事实不符,人们有理由不信任它.于是刚开始的研究遭到重创,此后 20 年宇宙学几乎没有进展.

2009-06-02 收到

[†] Email: yqyu@water.pku.edu.cn

1) 今天被称为大爆炸理论的一系列论文是 Gamow 等人在 1949 年前后两三年里发表的

顺便说, Hubble 在 1952 年过世, 到 50 年代后期, 他的学生辈才认识到老师在星系距离测量上犯了若干错误. 他把距离定小了, 于是把 H_0 夸大了. 它的实际值应在 50 到 100 之间(单位同上). 这样宇宙年龄在 100 到 200 亿年之间. 与任何可知的天体年龄相比没有明显的矛盾. 可是这进展并不足以挽回宇宙学的颓势. 形势的转机是由于 Gamow 理论的出现.

2 杰出创意遭贬斥

当欧洲(当时世界科学的中心)的大多数学者不接受宇宙膨胀理论时, 有一位从前听过 Friedmann 讲授宇宙学的 Gamow(见图 3)相信这理论. 他在 1949 年前后独到地想到, 按这理论, 星系不可能自古存在. 他开创性地研究了一切星系形成前的宇宙. 后来宇宙学主要研究的就是宇宙的演化, Gamow 迈出了第一步.



图 3 Gamow

首先的问题是: 一切星系形成前的宇宙是什么样的. 由于星系形成过程的不可逆, 要用物理规律来追溯回去是不可能的. 这时需要有洞察力的猜想. Gamow 猜想, 那时的宇宙应是一大片均匀的高温气体(无穷或有限), 因为按 Jeans 的自引力不稳定性理论, 均匀气体中的

小密度起伏是会发展出物质结块的. 至于事实是否如此, 事先无法知道. 他必须往前走, 指出他的理论与实际比较的后果. 为此他首先研究了化学元素的起源问题.

按 Gamow 的理论, 宇宙年龄为 $1s$ 时, 宇宙气体的温度会高达 $10^{10} K$, 即粒子的热动能约为 $1MeV$. 那时热碰撞足以使原子核解离, 所以化学元素应当是此后产生的. 当时已经初步知道, 氦在今天宇宙中的丰度约高达 $1/4$, 它是除氢之外丰度最高的元素. 虽然恒星中心的核燃烧会产生氦, 但估算表明远不可能产生这么多. 这当然是重要的好课题. Gamow 研究了它, 并发现宇宙早期的元素合成确实足以产生丰度达到 $1/4$ 的氦核. 这初步结果也很好. 可是用新理论来成功地解释一个未知事实并

不足以使人们相信它, 因为这解释不见得只有一种.

Gamow 研究的另一课题是背景辐射问题, 今天看来这课题确实价值更高. 在原初核合成后, 宇宙气体处于等离子状态. 随着宇宙膨胀, 气体将绝热降温. 在温度降到 $10^4 K$ 左右, 粒子热动能只剩 $1 eV$. 原子核与电子将开始结合成中性原子. 一旦电中性的原子成了主要组分, 原来热平衡等离子态下必然存在的光子组分就失去了碰撞的机会. 今天把这叫光子的退耦. 退耦后的光子当然会永远存在下去, 它就是现在人们讲的背景辐射. 背景光子虽然失去了碰撞, 但它过去的热平衡分布(Planck 分布)将保持. 其等效温度将继续随宇宙膨胀而降低. Gamow 估出它今天的温度约在 $10 K$ 左右, 其主要部分在微波波段. 今天依然存在着的微波背景辐射应当是可以直接观测到的. 对未知事实作出预言非常有价值, 因为若将来的观测证实了它, 那将是理论可信的有力证据. 偶然一致的几率是很低的.

现在回顾地看, 当年 Gamow 的理论(后来被叫做大爆炸理论)做得非常精美. 可是当时的学者却很不以为然. 在他们看来, 连宇宙膨胀都不可信, 用它推至这么早的宇宙还能信吗? 再说你把理论延伸到这么早, 那不是在帮助宗教重编“创世纪”吗? 于是欧洲的学者普遍地把这理论斥之为伪科学, 响应者寥寥. 它预言的背景辐射对或不对, 在当时完全是能检验的. 把“二战”结束留下的雷达天线改一下, 应当也能测到它的. 今天看, 测到它肯定是 Nobel 奖水平的成果, 可是当时竟没有人想做这件事!

宇宙学这 80 年, 其前一半真是命运多舛, 坎坎坷坷.

3 冬去春来起生机

到 20 世纪 60 年代初, Princeton 大学以 Peebles 和 Dicke 为首的几位学者重新想到了今天应当依然存在的微波背景辐射. 他们决意做微波探测器来寻找这早期宇宙的遗迹. 正当他们积极准备仪器的阶段, 离他们不远的 Bell 电话公司有两位工程师 Penzias 和 Wilson 在调试射电天线时意外地抢先发现了这背景辐射. 射电天线有未知背景存在对 Bell 公司是老问题. 人们不需要一定去弄清背景的来源, 而特别有寻根究底精神的 Penzias 和 Wilson 花很大力气去找它的原因. 最后他们排除了来自天线本身和地球近处的可能, 指出它是来自远处的辐射背景. 可是他们不了解早期宇宙有遗迹留下的理论. 在

与 Peebles 和 Dicke 接触交流后,双方决定各自写一篇论文,发表在 1965 年同一期《天体物理杂志》上. Penzias 和 Wilson 的文章很短,才 1000 来字.限于报道,他们在 4080MHz 发现一个温度为 3.5K 的过剩辐射,在测量限度内是各向同性的、非极化的、与季节变化无关的. Peebles, Dicke 等人的文章很长,详尽地讨论了这信号的宇宙学意义.事情的发展很戏剧性,我们只能长话短说.背景辐射的发现使许多人意识到 Gamow 的理论不是伪科学而值得认真对待,于是开始了宇宙学的春天.

大爆炸竟然不是伪科学,这事情太大,人们对此持很谨慎的态度.关键之点是怎么更可靠地证明所发现的背景辐射和大爆炸预言的背景辐射是一回事.如前所说,要编个理论来解释已肯定存在的背景辐射并不难.大爆炸理论的坚决反对者多年后还在做这样的事.

为澄清这疑问,人们首先想到可以做的是:从各个不同波长(频率)作同样的探索观测,希望既能找到它,又能由实测强度推断出同一温度——3 K 左右.这一步进展很顺利.当在 10 来个波长上都测到了接近相同温度的背景辐射后,瑞典皇家科学院有了信心,把 1978 年的 Nobel 物理奖授予了 Penzias 和 Wilson(当时 Gamow 已过世).这是大爆炸理论被学界充分肯定的标志.可是事情并不算结束.

考虑到早期宇宙是高度热平衡的,作为其遗迹的背景辐射谱应当与热辐射理论的 Planck 公式有高度的一致.注意太阳的辐射也是热辐射.由于太阳中间有高温核心,外部有低温环境,它不会有“高度的”热平衡,因此它的辐射谱注定会对 Planck 谱有很显著的偏离.观测也表明确实是这样.早期宇宙既没有外部,又没有内部差异,它应当是唯一能高度热平衡的客体.若观测表明它的辐射谱确实能与 Planck 公式精确拟合,那将是这辐射来自早期宇宙的铁证.于是人们继续向这方向努力.

遗憾的是人们做了很多尝试后认识到,因为地球大气的影 响,这件事几乎无法用地面测量来做到.用卫星在地球大气外做观测应是最好的选择.1989 年发射的 COBE 卫星(全称为 COsmic Background Explorer,见图 4),其主要目的之一就是做这件事.它在 0.1—10mm 之间的三十几个不同波长上安置了微波接收器,对背景辐射做精确测量.卫星上天不久,辐射谱的观测结果就得到了(见图 5).用 Planck 公式来拟合,竟可定出四位有效数字的辐射温度,它是 $T=2.735$ K. 这充分表明其辐射源的热平衡程

度之高.至此人们意识到,观测到的背景辐射来自早期宇宙,以及早期宇宙是一个高度热平衡的均匀气体已无可置疑了. COBE 的主要研究者 Smoot 和 Mather 赢得了 2006 年的 Nobel 物理学奖,上述结果是他们的主要成就之一.



图 4 COBE

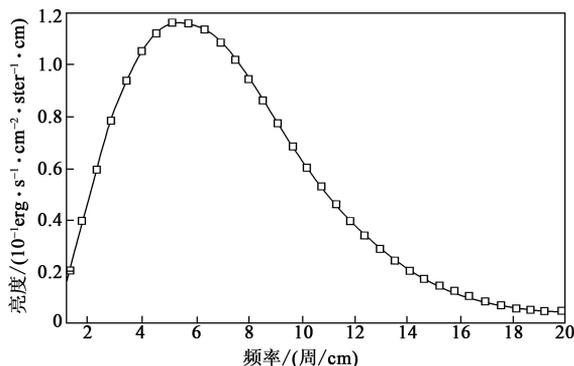


图 5 COBE 测到的背景光子谱

星系形成前的宇宙是高度热平衡的均匀气体,这原来是 Gamow 的猜想.一旦它得到证实,更早期宇宙演化的研究就有了牢固的基础.前面说到,星系形成前的宇宙是什么面貌,这不是用物理理论推演能回答的问题.研究背景辐射产生前的宇宙演化却不一样.那阶段宇宙是均匀气体的绝热膨胀,它是可逆过程.借助实测到的背景辐射形成时的物理状态往前推演,其结果是否可靠,只依赖于推演所涉及的物理规律是否可靠.于是从 20 世纪 70 年代后期起,早期宇宙演化的研究全面地发展了起来,呈现一派生机勃勃的景象.

4 峰回路转现曙光

让我们暂时从考虑早期宇宙演化的思路中退出来,回到星系的形成问题.明确了早期宇宙只是均匀气体,那么宇宙学有责任回答:今天以星系为基本

单元的宇宙是怎么演化出来的. 这是一个很基本、很不意外的问题, 可是故事的情节却意外地扑朔迷离. 让我们了解个梗概.

大家都知道, 均匀气体的结团很可能起因于自引力不稳定性. 考虑到宇宙在膨胀, 它对微小密度起伏的增大带来了阻尼, 使小扰动增长过程很缓慢. 在宇宙以辐射为主的早期, 密度反差 Δ 几乎不增长. 年龄到 10^4 年后, 宇宙转入实物为主阶段. 小扰动 Δ 才按正比于 $t^{2/3}$ 的方式增大. 按这种方式增长非常缓慢. 时间过去三个量级, Δ 才增大两个量级. 从 $t = 10^4$ 年到现在 (10^{10} 年), 宇宙年龄一共增大了 6 个量级, 微小的密度反差充其量放大了 4 个量级. 因而要星系能及时形成不是容易的事. 它要求早期宇宙中实际存在的密度反差 Δ 不能太小. 这些与星系形成有关的物理道理是早有共识的.

注意另外还有一个不利因素. 它与宇宙实物以重子为主还是以非重子为主有关. 从上世纪 70 年代的研究者看来, 宇宙中虽然有大量不发光的暗物质, 但本质上它们都是普通的重子物质. 按这样想, 在实物为主的前期 (即 10^4 年后不久), 由于光压的影响, 其上的密度反差 Δ 还是不会增长的. 必须等到于光压不起作用, 即光子退耦 ($t = 10^5$ 年) 后, 密度反差才能开始增长. 于是允许 Δ 增大的时间又损失了一个量级. 为了星系能及时形成, 早期实际的 Δ 还需要更大些.

背景辐射被肯定发现后, 人们试图去观测其上的密度反差. 在当时的测量精度下得到的是零结果, 即没有测到. 由此可推知早期宇宙中存在的 Δ 肯定小于 10^{-3} . 按这上限, 再把宇宙当然地看作是重子组成的, 那么星系今天应来不及形成. 可是星系已大量形成是铁的事实. 是什么地方错了, 造成这个理论与事实之间的灾难性的冲突? 人们连线索都看不到.

到上世纪 80 年代初, 一个偶然因素 (有人错误地认为中微子有很大的静质量) 让星系形成研究者抓到了一个要点. 若宇宙中存在的大量暗物质不是普通的重子物质 (例如是中微子), 那么它的密度起伏将不受光压的影响. 不必等到光子退耦, 只要到实物为主, 密度反差就开始增长了. 这就为 Δ 的增长多赢得一个量级的时间, 星系来不及形成的困惑或许就摆脱了. 于是研究者执着地相信宇宙是以非重子物质为主的. 他们在这假想前提下进行了许多尝试性研究, 并获得不少积极的感受. 因此他们期盼有宇宙实物以非重子为主的证据. 可是很多年里没有

出现这样的证据, 直到 21 世纪初.

今天讲宇宙学的成就不能不提 WMAP (全称为 Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 见图 6) 的贡献. 而且因为事关紧要, 值得多说几句. WMAP 是 2001 年上天的一颗观测微波背景辐射各向异性的科学卫星. 利用它有足够高的分辨率和测量精度, 使研究者能保留所有有关的未定参量而把理论结果与实测比较, 从而在让两者拟合一致的要求下把这些参量定了下来. 这真是了不起的成果. 宇宙学研究经过了 80 来年, 若干长期被期盼的结果终于出现了.

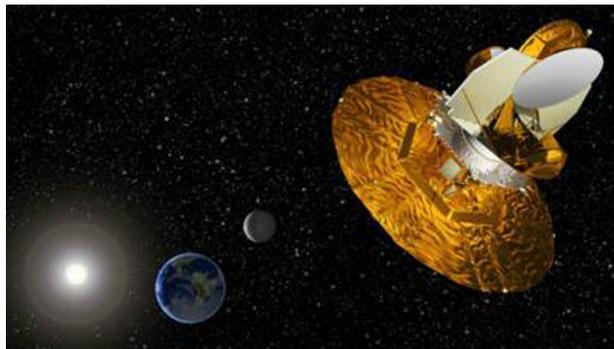


图 6 WMAP

宇宙总密度多大, 主要组分是哪几种, 各占多大百分比, 等效的真空能密度是否为零, 这些都是宇宙学的基本信息. WMAP 第一次确切地回答了: 宇宙总密度是 $\Omega_{\text{tot}} = 1.0$; 等效真空能是第一主要组分, 占总量的 70%, 实物占其余的 30%; 实物中普通重子物质只占 1/6, 而非重子占 5/6, 即非重子所占的比例显著地比重子高. 同一拟合也给出了 Hubble 常数值, 它是 $H_0 = 70 \text{ km/s/Mpc}$. 它表明 $\Omega_{\text{tot}} = 1.0$, 约相当于每立方米有 6 个氢原子的质量.

这些信息主要贡献是使宇宙演化研究的理论结果都确切化了. 现在人们常说, 宇宙学从此进入了精确科学的时代, 就是在这意义上讲的. 对星系形成研究, 它更无异于福音. 它既肯定了非重子为主是事实, 又肯定了真空能密度更主要. 这些结果与研究者的探索性研究时所期盼的结果十分接近. 星系形成理论走向成熟的曙光终于出现了.

5 漫长历史获澄清

回到我们的主题上来. 宇宙学的极终目标是借助观测事实和已知物理规律把宇宙的演化历史完全弄清楚. 所谓清楚是指回答两个问题: 一是任何时刻宇宙物质的组分和物理状态是什么; 二是为什么会

是这样. 由物理学的发展水平决定, 所做的回答须是定量的. 让我们看, 经过这 80 多年, 目标达到了多少.

简单地做个结论: 从宇宙年龄为 1 秒到今天(年龄是 140 亿年), 演化过程已相当清楚, 结果已相当可靠了.

1 秒时的宇宙温度 (10^{10} K) 决定当时非但没有恒星、星系等天体, 连分子、原子和化学元素都尚不存在. 有的只是质子、中子、电子、光子等基元性粒子. 随着膨胀降温, 到宇宙年龄为 1 小时才合成了最早的原子核. 主要是氢、氦及其同位素, 还有微量的锂、铍、硼. 宇宙的原初核合成造不出碳、氮、氧或更重的元素. 它们都是恒星过程的产物. 因为当时粒子能量在核物理的能量范围内, 其规律比较清楚, 所以每种轻元素合成了多少都能可靠地算出. 当有了原子核, 气体进入了等离子状态.

到宇宙年龄为 10^5 年, 温度降到 10^4 K, 离子开始与电子结合成中性原子, 并使得光子组分退耦而变成了背景光子. 宇宙介质包含了两种不相耦合的独立组分, 各自演化. 背景光子简单地因膨胀而减低等效温度. 中性原子气体上的微小密度和温度起伏开始因自引力不稳定性而增大, 向结团的方向演化.

到宇宙年龄为 10^9 年, 开始有最早结团的星系. 此后星系本身和星系间的结团逐渐发展. 同时星系内部再因自引力不稳定性而形成恒星. 恒星内的核燃烧产生了从碳到铁的中重元素. 铁后元素则是大质量恒星死亡前的超新星爆发的产物.

到 140 亿年后的今天, 宇宙正好演化到如同我们实际看到的那样. 注意, 宇宙结构形成并不是一个完成了的过程. 今天只是这过程中的一个普通的片刻. 星系的形成和结团依然在进行着.

这就是这段演化历史的简单描述. 基于有关观测事实和有关物理规律都较可靠, 这段演化历史已具有了很高的可信性. 生活在已演化了 140 亿年的宇宙中的人类居然能把这么漫长的演化史探索得这么清楚, 这无疑是很震撼人心的成就, 人类智慧的骄傲. 80 年的坎坷和迷茫实不足道!

6 未决疑问更深邃

宇宙的概念囊括了自然界的一切, 它不再有“外界”. 任何从宇宙现象提出的问题, 答案只能从自己的历史中寻找, 即它注定依然是宇宙学的问题. 这性质决定, 它是一门允许并应该对任何事实问一个“为

什么”的独特学科. 于是当旧的宇宙学问题找到了答案时, 往往会有新的更深邃的问题出现. 在看到它已发展得相当成熟的同时, 不应不注意到, 遗留下来的未决问题不仅不少, 而且都是极有价值的问题.

讨论宇宙学的未决问题需要专文, 它不是本文能担当的. 这里只想略为探讨一下它们的价值. 为此我们罗列如下五个主要的未决问题.

(1) 通常讲 WMAP 测到了真空能, 其实更确切地说, 它是推断出了今天的宇宙在加速膨胀. 膨胀的加速需要有斥性的引力(指 gravity, 不指 attractive force). 任何已知物质不会产生这样的引力, 那么它来自什么? 一定来自(等效)真空能吗?

(2) WMAP 测到了非重子实物的密度, 它比重子实物高好多倍. 它会是什么粒子? 从宇宙学看, 任何稳定的、与仪器作用很弱的粒子都可以充当候选者. 可是在已发现的粒子中连候选者都没有.

(3) 宇宙中没有大块的反重子物质, 这已是用观测认真探索过的事实. 追溯到热碰撞会大量产生正反重子的甚早期, 这事实表明, 当时重子比反重子多 1 亿分之几. 这微小的差异是怎么从演化中产生的?

(4) 微波背景辐射上观测到了超视界的均匀性和超视界尺度的小扰动, 这是肯定的事实. 超视界意味着任何物理原因不可能解释它. 理论家又不愿意把它归之于宇宙的初条件, 于是寄希望于猜测性的暴涨理论. 可是用什么来证实暴涨确实发生过?

(5) 服从经典广义相对论的宇宙叫经典宇宙. 它注定有其来源问题. 通常叫经典宇宙的“创生”问题. 研究者心中的答案是经典宇宙来自量子宇宙, 即服从量子引力规律的宇宙. 可是量子引力的存在还没有证据. 研究者的猜测对吗?

上述问题本身都是源于肯定事实的真问题, 但都还没有明确的答案. 可以看出, 它们的答案都应当与年龄远小于 1 秒的演化有关. 由于那阶段的能量尺度太高, 今天的高能物理还没有可靠地掌握其规律. 因此, 这些问题的未决与其说是宇宙学的不足, 不如说是物理学的不足. 宇宙学发展到能向物理学提示应当解决的问题, 这同样是它成熟的表现. 今天的宇宙学会得到物理界普遍关注和重视, 其原因正在这里.

回顾宇宙学这 80 年, 昔日的挫折与迷茫已转为今日的成就, 今日的困惑与挑战正导向明日新的辉煌. 宇宙学就是这样向世人展示着自己的魅力.