

窥视苍穹: 从肉眼观星到太空望远镜

任 凭 邢志忠

“我的目标很简单,就是完全理解我们的宇宙,弄清它为什么会是今天这个样子,以及它究竟为什么存在。”《时间简史》的作者斯蒂芬·霍金恰如其分地表达了那种自远古时代起就不断驱使科学家和哲学家去研究宇宙的求知欲望。适用于地球本身的物理定律也同样适用于天文尺度,这一简单假设



在建立宇宙模型方面的成功令人瞩目,从而导致物理学根本性的飞跃和实用技术天翻地覆的进步。考虑到客观条件对天文观测的苛刻限制,我们能在理解宇宙的道路上走得如此之远可谓十分不寻常了。其他物理学家可通过改变和限制各种参数来检测一个封闭系统的变化,而宇宙的宽广无垠却意味着天文学家无能为力,永远受制于大自然。因此,实验科学中这个出类拔萃的分支理应得到公平对待和充分认可。本文旨在简要回顾天文学观测从早期的肉眼观星发展到如今发射造价数十亿美金的太空望远镜的精彩历程。

肉眼观星

对晴朗夜空匆匆一瞥,就会看到无数的星辰、星座、星团和星云,因而人们不难理解为什么天文学始终能够吸引人类的好奇心。虽然“天体”和占卜被人为地联系起来,但是远古文明在天文观测方面仍然取得了显著进步。最突出的当属中国天文

学家的贡献,早在公元前1400年,中国人就详细记录了日蚀和月蚀现象并努力研究它们的成因。中国阴历蕴涵了关于月亮和行星转动周期的详尽数学计算,其他远古文明也都独立地建立了这种历法。然而有关行星系统的正式模型则主要是希腊人的贡献。公元200年,托勒密基于肉眼观测行星的大量资料提出了行星围绕地球运动的模型。他引入复杂的“本轮”和“均轮”概念来解释其模型与行星实际运动轨道的偏离。托勒密的“地心说”模型对于指导人类航海已足够精确,而且更为重要的是,它和教会的主张不谋而合,因此该模型1000多年来从未遭到质疑。

的实现过程都是不可逆的。但是如何定量描述这种自然过程的方向性却成了问题。

人们通过研究发现,在热力学过程中,热量对温度之比的积分与过程无关,而只与始、末态有关。因此,系统必然存在一个只与系统状态有关的态函数,其差值就是热量对温度的比在相应状态的定积分。根据克劳修斯的建议,这个态函数叫熵(entropy),用 S 表示。于是便有了 $dS = \delta Q / T$,意为可逆过程中系统熵的微小变化与它在这一过程中所吸收的热量被热源所除而得的商值相等。那么热力学第二定律也可用熵表述为:在孤立系统中,任何变化不可能导致熵减少,即 $dS \geq 0$ 。变化过程可逆, $dS = 0$;变化过程不可逆, $dS > 0$ 。总之,熵有增无减,因此热力学第二定律亦称熵增定律。

克劳修斯提出的 entropy(熵)一词实为热力学熵,是判断不可逆过程进行方向的依据,该词源自希腊词语“τροπή”,意为“转换”。后来熵的内涵不断扩

大,逐渐形成广义熵的概念。香农首先将熵的概念推广到信息论领域,为定量计算信息量提供了明确方法。之后,熵被广泛用于农业系统、生命系统、城市系统,甚至社会科学领域,作为系统状态(这个状态可以是热学的也可以不是热学的)的混乱度不确定性、信息缺乏度、不均匀性、丰富度等的量度。

熵首次被介绍到中国是在1923年,当时德国科学家普朗克来中国讲学,时任南京高等师范学校物理系主任的我国近代物理学事业奠基人之一胡刚复教授担任翻译。普朗克在讲学过程中用到了“entropy”,胡刚复教授觉得该词含义太过丰富,怎么解释可能都不够准确。他看到这是一个热力学量,又是热量与温度之商,于是灵机一动,把“商”字加“火”旁意译 entropy,便创造了“熵”字。

(河北省保定市华北电力大学数理系 071003)

华北电力大学青年教师科研基金 200611027 号。

望远镜

第谷发明的那些聪明绝顶的观测方法使人类的肉眼观测能力达到极限。1608年伽利略在天体观测中首次使用望远镜,从而引发了一场天文学的新革命。伽利略发明了一架折射式望远镜,并将其放大倍数从8倍改进到20倍。他利用这架望远镜发现了木星的卫星,并研究了金星的月相。尽管收集到的数值证据不容置疑地支持“日心说”模型,然而伽利略的科学主张在当时却无人问津。他发明的望远镜也因教会的禁令而不见天日,后来才被公认为可靠的天文观测工具。



图1 中国天文学家在标定夏至点
(© <http://www.math.nus.edu.sg>)

中世纪后期,欧洲人恢复了对自然科学的热情。哥白尼因提出“日心说”而被教会谴责为异教徒,反而激起大众对天文学的浓厚兴趣。其中最令人关注的是丹麦天文学家第谷·布拉赫,他力求解决哥白尼假说引发的争议而坚持不懈地记录和归纳天体的运动状态。1572年,他通过国王弗瑞德里克二世的授权在丹麦之外的海岛上建立了两个豪华气派的天文台。据说这位性格独特的国王曾用丹麦国民生产总值的10%赞助第谷的研究,这对今天的科学家而言绝对是梦寐以求的。第谷才华横溢,他在望远镜发明之前创造性地运用当时的仪器和技术,使肉眼测量行星运动导致的视差精确到1弧分。图2是其中一种测量视差方法的示意图。第谷的助手约翰尼斯·开普勒通过艰苦的数据收集和整理,得出现在被称为开普勒定律的三个原理,从而证实了哥白尼的行星模型。



图2 第谷利用壁画上的四分仪演示天文观测

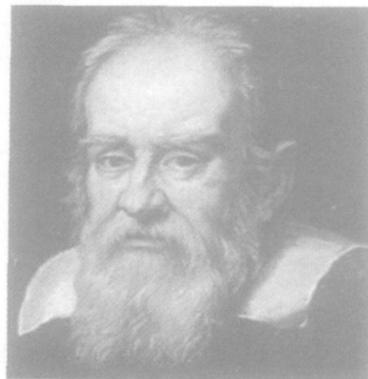


图3 伽利略的肖像画(© <http://artwrp.gsfc.nasa.gov>, 2001)

艾萨克·牛顿在物理学的理论和实验两方面都做出了影响深远的非凡贡献。他的万有引力定律再次肯定,天上的物体和地上的物体都遵循相同的运动规律。他在几何光学方面的奠基性贡献,对天文学而言,实为天赐之物。牛顿发现,折射式望远镜的观测能力会因色散效应而受到限制。于是他在1671年白手起家,发明了反射式望远镜。由于反射镜的直径更宽,使牛顿的望远镜具有更高的分辨率。甚至在今天,具有类似造型的反射式望远镜仍为世界各地天文爱好者所使用。

反射式望远镜的发明使天文观测达到几个弧秒



图4 牛顿的6英寸反射望远镜的复制品
(© Andrew Dunn, 2004)

的分辨率,于是天文学家开始进行视差极其微小的测量。1676年,丹麦天文学家奥莱·罗摩尔对木星的I_o号卫星的轨道周期做了细致的观测记录,发现它在一年当中不断变化。他推测这是由于木卫I_o发出的光到达地球所需的有限时间在不断变化。根据这些测量结果,可算出光的速度为1.35亿米/秒。鉴于此前人们一直认为光以无穷大的速度传播,罗摩尔的发现可以说是天文学的一次重大飞跃。

“量天尺”

到了18世纪的时候,太阳系的数据已编录得相当完整,但是对其他恒星知之甚少。要想研究恒星的结构和性质,就必须测出恒星之间和恒星与地球之间的距离,距离的测量成为摆在人们面前的艰巨任务。1838年弗里德里克·贝塞尔取得了重大突破,他利用恒星视差测量了西格尼61号恒星的距离。当地球处于其绕太阳转动轨道的不同位置时,会造成观察者对同一个近距离恒星的角视差。利用这一点可以算出西格尼61号恒星的距离,结果为3个天文秒差距(1秒差距=3.26光年)。然而,视差方法只适用于相对地球轨道有明显角偏离的近距离恒星,因此天文学家开始寻找研究远距离恒星的其他测量方法。

一种方法是增大望远镜的角分辨率。根据描述透镜分辨率的瑞利判据,增大镜头光圈的尺寸,就能得到更高的分辨率。19世纪可以称得上是挥霍般地投资建设超大望远镜的时期。威廉·赫斯的49英寸折射式望远镜标志着这一浪潮的开始,乔治·哈勒的60英寸、100英寸望远镜则标志着这一浪潮的顶峰。后者由行为古怪乖张的百万富翁约翰·胡克赞助,建于威尔逊山天文台。消色差镜头的问世和更先进的镜头制造技术,使望远镜的角分辨率远低于0.1弧秒,而这已接近光学天文观测精度的极限。由于测出了地球附近的那些恒星的距离,人们理所当然地把它们用作测量其他恒星距离的“量天尺”。

19世纪也是光谱学飞速发展的世纪。约瑟夫·冯·夫琅和费发现来自太阳的辐射光谱中存在几条吸收谱线。1858年,德国物理学家古斯塔夫斯·基尔霍夫发现每一种化学元素都有分立的特征吸收谱线,于是人们开始用摄谱仪研究恒星的化学成分,从而推动了恒星物理学的发展,通过研究太阳光谱又发现了氦元素。天文学家开始进一步把恒星的组分与其年龄和亮度联系起来。这些研究成果促使科学

家于1906年编制出赫罗图(HRD),给出了恒星的亮度、光谱与年龄之间的关系。随着光谱学的发展,各大天文台利用自己的大型望远镜对恒星亮度进行编录分类,科学家期盼已久的更有效的“量天尺”就这样在不知不觉中形成了。



图5 海伦塔·斯沃恩·利维特(© AAVSO 2005)

1910年前后,一些亮度不稳定的恒星引起了天文学家的兴趣。特别是一类被称作“造父变星”的恒星,其亮度呈周期性变化。哈佛学院天文台的海伦塔·利维特在仔细研究麦哲伦星云中大量彼此相邻的造父变星之后认为,一颗

造父变星的亮度变化周期正比于它的绝对亮度。随后,埃吉纳·赫兹普龙利用恒星视差测量出地球附近的造父变星的距离。于是,为了测量一颗遥远恒星的距离,首先要测量一颗邻近造父变星的亮度及其变化周期。演绎自造父变星的“量天尺”至今仍是已知最精确的天文测距方法。



图6 仙女座星云(摄于1899年, © Isaac Roberts)

大辩论

19世纪,许多天文台记录了对遥远星云的观测。关于这些星云内在本质的争论也逐渐在天文学家之间展开。一部分人坚持认为它们是银河系的天体,而其他人则认为它们是遥远的星系。1920年,在后来被称为“大辩论”的讨论会上,争论双方发表了各自的看法。然而这个问题直到1924年才被美国天文学家埃德温·哈勃最终解决。借助威尔逊山天文台的100英寸超大型胡克望远镜,哈勃发现这些星云距地球约100万~1亿光年,远远超过银河系的尺寸。他观察到星云之中存在大量恒星,于是得出结论:这些星云不过是宇宙中无数遥远星系的

一小部分而已。短短的几个月内我们的宇宙图像就扩张了几十亿倍,而这正是天文学观测的迷人之处。

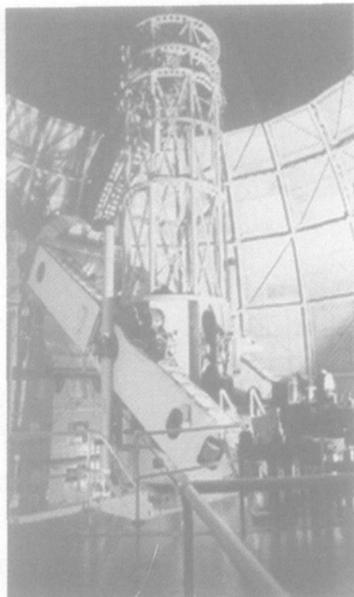


图7 埃德温·哈勃使用的威尔逊山天文台 100 英寸胡克望远镜(© Andrew Dunn)

到 1917 年,科学家在使用分光望远镜研究河外星系时发现,特征元素的吸收波长有所增大(这种现象被归因于多普勒效应),进而可推断河外星系相对于我们渐行渐远,即所谓的“红移”。1928 年,哈勃把星系距离和红移的测量结果结合起来,发现二者成正比。在研究了 46 个星系后,他给出了红移的经验公式 $v = H_0 d$, 其中哈勃常数 $H_0 = 500 \text{ km/sMpc}$ 。退行速度正比于星系间的距离,意味着宇宙在不断膨胀。哈勃的发现支持了伽莫夫的“大爆炸理论”,并引发了一场关于宇宙起源问题的激烈争论,迄今仍未尘埃落定。

无线电

1930 年,天文学家开始寻找拓宽天文观测范围

的新方法。此后几十年内一系列的机缘巧合促成了射电天文学的诞生,后者当之无愧地取代了光学观测方法的统治地位。时至 1932 年,贝尔实验室要求其雇员卡尔·央斯基研究一下可能干扰越洋无线电信号的静态噪音。央斯基的无线电天线除了探测到静态噪音,也探测到了一种意想不到的噪声。这种噪声以



图8 射电天文学之父卡尔·央斯基(© <http://scienceworld.wolfram.com>)

一个恒星日(23 小时 56 分钟)而不是以一个太阳日(24 小时)为周期变化着。经过两年的研究,央斯基得出结论:噪声源位于银河系中心附近。尽管这一发现在当时被大肆宣扬了一番,但对它感兴趣的全都是电气工程师。直到第二次世界大战结束之后,无线电技术才引起天体物理学界的重视。



图9 剑桥偶极子天线阵列(© <http://www.mrao.cam.ac.uk>)

无线电天线具有造价低、故障率小、携带轻便和尺寸大等优点,但是其分辨率不够理想,在测量精度上存在一些问题。由于角分辨率正比于波长 λ 如果 $\lambda \approx 1$ 米,那么天线的角分辨率只能达到几弧度的量级。马丁·赖尔天才地开创了无线电干涉测量技术和孔径综合技术,从而避开了这些困难。其实早在 1890 年,艾伯特·迈克尔逊就发现,从一个视角有限的物体发出的光可通过分开的相干接收仪器产生干涉条纹。尽管这个想法在当时仅有限地用于光学天文观测,然而赖尔却借此制造了“无线电版”的迈克尔逊干涉仪。在把间隔排布的天线阵列所产生的信号做混合处理后,他发现测量结果的角分辨率与天线阵列的幅度相对应。考虑到地球自转,赖尔把上述手段同孔径综合技术结合起来。不同时间的重复测量相当于一长排的干涉仪,从而获得了无线电背景天空的高质量图像。

射电天文学家通过坚定不移的努力,终于达到使角分辨率远低于 1 弧秒的测量精度。剑桥的射电天文学研究小组使用他们的偶极碟型卫星天线阵列,带头坚持不懈地绘制无线电背景天空。他们在编辑 2C 和 3C 剑桥目录的过程中,发现了大量无法用光学望远镜观测的射电星系和射电恒星,即“类恒星”射电源(类星体)。另外值得一提的著名发现是安东尼·休伊什的研究小组观测到了脉冲星。他的学生约瑟琳·贝尔在使用姆拉德射电望远镜研究星际闪光现象时,发现了一个以 $1/10^9$ 秒为周期发射电磁信号的射电源。先前从未观测到周期如此之小

的无线电信号。随后的深入研究证实,该射电源是一个自旋的中子星。此后对星体演化的研究,不再局限于主星序。

“宇宙微波背景”(CMB)是射电天文学的另一重大发现。安诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊在利用一个超灵敏的喇叭形天线探测气球卫星的无线电波时,发现存在一个稳定的、均匀分布于整个无线电背景天空的剩余噪声信号。人们随即意识到这就是大爆炸理论家在10年前所预言的微波背景辐射,它由宇宙初期大爆炸后遗留下来的光子构成。这使“宇宙起源”问题的天平开始向大爆炸模型倾斜了。

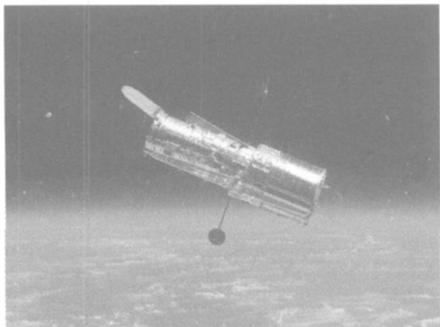


图10 从“发现号”航天飞机上看哈勃天文望远镜(©NASA)

在随后的几十年里,射电天文学得到了迅猛发展。英国、美国、澳大利亚和印度等国陆续建立大型射电天文台,其跨距达到数百千米(即角分辨率达到0.01弧秒的精度)。20世纪80年代更诞生了“甚长基线干涉仪”(VLBI),其天线彼此相隔非常远,并能与当地原子钟保持同步,这使射电天文学家能够对射电源做许多高精度的测量。射电天文学的成功也促进了X射线天文学以及红外、微波天文学的建立和发展,成为人类探索宇宙的有效工具。

太空望远镜

第二次世界大战后,人造卫星技术发展迅速。天文学家开始考虑把望远镜送上太空,因为那里不受噪声和大气变化的影响。1990年发射升空的哈勃望远镜,直径2.4米,探测范围可覆盖宇宙线的可见光波段,而X射线区域则由钱德拉塞卡望远镜探测。1992年,宇宙微波背景探测器(COBE)测量到微波背景辐射的微小涨落,为大爆炸模型提供了决定性证据。COBE的观测结果为后来的WMAP观测实验所证实,后者标志着宇宙学的精确测量时代正在到来。一系列新的太空计划也在酝酿之中,目标在于研究宇宙线光谱的红外、微波和紫外区域。

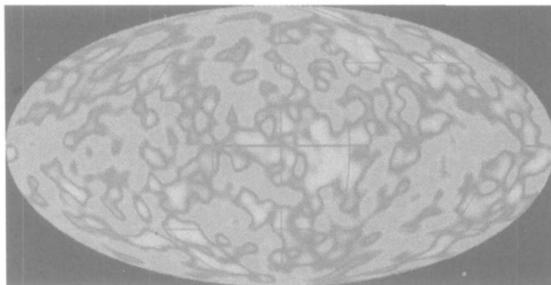


图11 著名的“宇宙背景图像”,从中可以看出微波背景辐射的各向异性(©NASA)

同时,射电天文学的前景也是一片光明。甚长基线干涉仪的出现促使人们提出了“太空甚长基线干涉仪”(SVLBI)的大科学项目。作为这一系列探索计划中的一环,第一艘太空飞船HALCA号已于1997年发射升空。一些射电天文台也雄心勃勃地计划在月球以及地球、太阳之间的L5拉格朗日点放置无线电人造卫星。这样一来,一个太空干涉仪的基线可达1亿米量级,相应的角分辨率将远远低于0.0001弧秒。这预示着高精度天体物理学即将进入一个崭新的时代。



图12 WMAP空间探测器(©NASA)

天文学的历史发展恰似一段十分迷人的旅程,其驱动力来自“看得更广阔”这样一个不懈的追求,其牵引力来自无数天文学家的天赋和洞察力,其成功也得益于一些“幸运的”偶然事件。如今的天文学观测已经成为一门基础牢靠、技术先进的学科。其未来充满了对未知宇宙的新探索,毫无疑问也会充满令人期待的辉煌。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

译自 *Physics Update* 10(2006)50, A. Soumyanarayanan 的科普论文 *Expanding the Cosmos: The Evolution of Observational Astrophysics*.