

关于近代天体物理学

中国科学院紫金山天文台恒星研究室

天体物理学是研究宇宙间物质运动的形态和规律的科学。它主要利用物理学的方法和理论,通过天文望远镜等工具探索恒星、星云、星团、星协、银河系、河外星系等各种天体和天体系统以及星际物质的物理状态、化学成分和演变规律;亦即探测天体上各种化学元素的含量、物质密度、温度、压力、辐射强度、磁场、产能方式、发光机制、变光或爆发过程;测定天体的质量、大小、距离、运动速度以及各种天体和天体系统的结构和相互关系,等等;并在此基础上进而研究它们的起源和演化,使人类对物质世界的认识不断深化,不断扩大。

研究天体的起源和演化(包括宇宙论)是天体物理学的主要任务。通过对各种天体长期仔细的观测分析,大量事实充分说明了宇宙间运动着的物质(一切天体,从地球、太阳到千千万万颗星星,直至庞大的星系)都是在不断变化发展的,都有其发生、发展和消亡的过程。在我们银河系里,现在就有一些恒星在诞生,也有一些恒星度着它们的晚年,甚至处于崩溃、瓦解、灭亡之中。这就推翻了过去认为天体在一朝形成之后就永恒不变的形而上学观点。但是,在天体演化学,特别是在宇宙论的研究中,两种宇宙观的斗争还是十分激烈的。一些资产阶级学者对天文学上的新成就、新发现给以唯心主义、形而上学的说明,提出了宇宙是有限的,所有天体都在同一时刻产生,物质不断从虚无中创造出来等一系列荒谬观点。对这些形形色色的唯心主义、形而上学的观点进行科学的分析和批判,肃清其流毒,这是天体物理学的重要任务。

天体物理学的研究手段,其观测实验工具是从地面光学望远镜、射电望远镜到空中天文台等各种现代化仪器设备。其基本技术,除大量使用物理学常用的光谱分析、光度测量和电波接收等技术外,还充分利用 γ 射线、X射线、紫外线、红外线以及高能粒子探测等近代物理学新技术;在理论方面,除利用经典力学、流体力学、热力学、原子物理、量子力学等这些基本物理理论外,还大量使用磁流体力学、等离子体物理、非热致辐射理论、核物理、“基本粒子”物理以及广义相对论等近代物理理论。实际上,当前,天体物理学可以说是物理学的前沿阵地。

由于宇宙空间有着远比地球上复杂而规模宏大得多的物理现象,譬如:一般恒星内部深处的温度高达

数千万度,而广漠的星系际空间则接近绝对零度;白矮星,特别是新近发现而正深入研究中的中子星的密度比地球上物体的密度平均高出上千亿倍,而星际气体则稀薄到每立方厘米平均不到一个氢原子;超新星爆发时能量可突然增加数千万倍,甚至它本身就如此碎裂瓦解;星系核活动和类星体等高能天体现象的能量还要大出许多万万倍,如此等等。这些都是地球上难以实现的,甚至根本无法达到的。可以说,宇宙空间是一个极好的天然物理实验室。因此,天体物理学一方面随着近代物理学的发展而发展,同时它的许多成就又推动着物理学不断前进。甚至当原有物理理论不足以说明新发现的现象时,就不得不迫使物理学作出新的选择,提出新的理论,大家知道,原子能理论的建立是直接受到太阳和恒星能源研究的影响。五十年代出现,现在广泛应用于可控热核反应研究中的等离子体物理和磁流体力学,则首先为了天体物理研究的需要才发展起来的。至于近代物理学的一个重要理论——广义相对论,它所预言的效应,大多数只有在宇宙空间里庞大的物质运动过程中才能明显表现出来,因而也只有通过天文观测才能进行验证。总而言之,天体物理学和物理学是互相促进、共同发展的。

从宇宙空间来的高能粒子,现在已发现的,能量高达 10^{11} 电子伏特,比目前世界上最大的加速器得到的高能粒子的能量高出十亿倍。对这些高能宇宙线粒子的起源和加速机制的研究,无疑对“基本粒子”的研究会有很大帮助。而最近发现在星际空间存在有机分子和在陨星中有氨基酸,这又使天体物理学与生命起源问题挂起钩来。这样,自然科学三大基本理论问题:天体演化、物质结构和生命起源,是有着不可分割的联系。此外,地球也是一个天体,天文学的成就也可直接应用到地球科学的研究中来,并为人类改造自然服务。

天体物理学研究范围非常广阔,对象十分繁杂,从不同角度又可划分为许多小分支学科,譬如,由于太阳和行星的研究有其一定特点和相对的独立性,所以常常把它们叫做太阳物理学和行星物理学。

近年来,天体物理学取得了很大进展,受到国际上愈来愈多的重视。与十多年前相比,在实测天体物理学方面,观测手段得到飞速发展。传统的大型光学望远镜的数量成倍增加,质量也有所提高。特别是近年

来一些新的设计思想的提出,如多镜面综合口径,可能将使光学望远镜技术来一次革新。至于大射电望远镜,发展更为迅速。利用现代电子学的成就,射电天文技术不断提高,向大口径、综合口径和长基线干涉仪发展,角分辨率高达千分之一角秒,甚至万分之一角秒,灵敏度则可鉴别宇宙辐射温度一度之差。随着星际航行时代的到来,一些新技术也应用到天文学领域里来。大气外天文观测和红外辐射探测器的不断发展和完善,进一步扩展了观测波段,显著地扩大了天文学的领域。随之而来的X射线源、超紫外辐射星和红外星等前所不知的新天体的发现,大大丰富了人们对宇宙的认识,对天体演化学也具有深远的意义。今天,人们已经能够由 γ 射线、X射线、紫外线、可见光、红外线直到米波无线电波的整个电磁辐射谱内对天体进行卓有成效的观测研究。一个全波天文学的时代已经到来。

辐射接收器、附属设备的改进,对于提高灵敏度、增加望远镜的效力所起的功用往往不亚于望远镜口径的增加,而费用则大为节省。光电成像技术现在已广泛应用到暗弱天体的光谱分析中,大大地增强了望远镜的威力。傅立叶光谱仪的使用将使光谱分析出现一个崭新的面貌。现代光电测光新技术,不仅使高精度光电光度测量达到极暗弱的天体,而且能够鉴别象脉冲星的光学脉冲那样周期只有百分之几秒的极快速光度变化。此外,电子计算机的大量使用,实现了由观测到资料分析、处理全过程的自动化,大大提高了效率。

观测实验技术的提高,为一系列重大发现创造了条件。红外天体的大量发现对恒星的形成和演化提供了重要的资料。宇宙背景可能存在 3°K 的辐射关系到宇宙论的根本问题。星际有机分子的发现,则对生命起源问题的研究具有重大的意义。而最突出的是类星体、脉冲星和X射线源等高能天体的发现。它们所表现出的某些物理特性和观测事实使天文学和物理学受到挑战,对这些天体的研究形成了一门新的天体物理学分支——高能天体物理学。下面扼要介绍有关情况。

类星体

1960年证认第一颗类星体3C48以来,现已发现了约四百个。类星体最突出的现象是具有很大的谱线红移值,最大的 $\Delta\lambda/\lambda$ 值达3.4。若认为它们位于宇宙论距离,红移由远离我们的高速运动所引起,则它们所释放的能量之巨大为已知一切产能机制所无法解释。光度最大的类星体的辐射功率为 10^{47} 尔格/秒,为太阳的 10^{13} 倍,远远超过一个星系所发出的功率,因而是已知最强的辐射天体。而从某些类星体具有几天到几个月的光度变化推测,它们的体积相对地说是很小的,线长度在几光天到几光月的范围内,比一般星系的直径小了几十万倍!若它们不在宇宙论距离,红移用

重力红移解释,又遇到无法克服的困难。这是因为大部分类星体出现发射禁线和宽的容许线。禁线必产生在低压区域,那里的重力势必比容许线形成的区域为低,因而应该出现较小的红移。但观测事实表明,禁线和容许线有着相同的红移值。此外,发射线的半宽度常达50埃。若以多普勒加宽来解释,内部速度将达每秒几千公里。具有这样高的内部运动速度的天体,其体积又只有几光天大小,要能稳定,它的质量至少是 10^7 太阳质量。困难之点是怎样解释在小体积内聚集大质量和产生大能量的问题。因此,它们的距离问题,实际上也就是红移问题,一直是未解决的难题。随着类星体的深入研究,随着射电源与星系,或星系与星系的妥协,以及它们之间巨大红移差异的发现,红移问题越来越尖锐。这或许需要新的物理理论。有人尝试用光子和光子或光子和引力子相互作用来解释红移,但没有成功,这向天文学和物理学提出了挑战。

脉冲星

从1967年发现第一个脉冲星CP1919,到现在已有八十多个。它们的脉冲周期极短而且稳定,一般在0.03—4.0秒范围内。解释脉冲星的理论很多,其中以认为脉冲周期为自转周期的中子星模型较为满意;但在解释脉冲星特性细节方面,还存在不少困难。中子星和黑洞都是目前高能物理、广义相对论中热烈讨论的对象。根据引力理论,质量为太阳质量一两倍的中等质量的恒星,演化到晚期收缩到直径为几十公里量级以后,就可能成为主要由中子组成的高密(10^{11} — 10^{15} 克/厘米³)、强磁场(10^{12} 高斯)且快速自转着的中子星;质量在两个太阳质量以上的恒星,演化到晚期收缩到一定大小以后,就可能成为密度比中子星还高的黑洞,它会发生引力封闭,除引力作用外,一切电磁辐射无法输送到外界;而小质量星则演化为白矮星。

脉冲星和超新星遗迹在观测上存在着密切联系:脉冲星NP0532就位于我国宋代1054年观测到的超新星爆发的遗迹——蟹状星云的中央。另一颗脉冲星PSR0833是在射电源Vela-x里面边界处,Vela-x是船帆座超新星气壳的一部分。这是两个比较公认的例子。根据我国古代新星观测记录,至1969年发现的26个脉冲星中,有16个可与超新星爆发对应起来。有人认为脉冲星就是超新星爆发的后果。这具有十分重要的演化意义。

X射线源

大气外观测X射线源,自1970年12月美国使用专供观测X射线的人造卫星“乌呼鲁”(Uhuru)以来,进展较快。1972年12月发表的Uhuru X射线源表载有125个源,其中80个在银面 $\pm 20^{\circ}$ 范围内,其余均匀地分布在各银纬。有些高银纬源是河外源。星系丰

富的星系团往往是X射线源,如室女、后发、英仙星系团等。室女星系团的最强X射线源广延达 1° ,星系M87在其中心。估计这个星系团的150个星系,每个的平均X射线的光度为 2×10^{44} 尔格/秒。

有一些X射线源,经光学证认已确定为密近双星的成员星,如半人马X-3,武仙X-1,天鹅X-1以及小麦哲伦云中的X-1,等等。除了天鹅X-1是分光双星外,其余都是食变星。有的X射线星还是X射线脉冲星;例如武仙X-1的X射线脉冲周期为1.24秒,并伴有1.24秒脉冲周期的正弦性变化,这起因于轨道运动的多普勒效应,轨道周期为1.7天。这类双星系统,其中一个成员已演化到晚期阶段,即可能是白矮星、中子星或黑洞。具有X射线脉冲的双星,一般认为其中一个成员已演化为快速自转的中子星。天鹅X-1经光学证认为9等左右的O型超巨星。根据最近光谱分析表明,它的伴星的质量大于白矮星或中子星的上限,因而可能是黑洞,其X射线为来自向伴星落下的气流物质所激发,这说明X射线源是由吸积物质供应能量。这类星具有重要的演化意义。

宇宙背景辐射

四十年代加莫夫等提出了大爆炸宇宙论,认为有宇宙背景辐射存在。差不多过了二十年,1965年有人发现了各向同性、无偏振、不随季节变化的宇宙辐射背景,在波段0.33—73.5厘米范围内测得十多个数据,所得温度为 $2.5^\circ\text{—}3.7^\circ\text{K}$,误差为 $\pm(0.5\text{—}1.0^\circ\text{K})$ 。根据黑体辐射的性质,重要的是在短波方面,即在0.3—3毫米范围内,背景辐射的能谱是否也符合 3°K 黑体的辐射。但是,通过下面三种方法求得的结果并未完全得到证实:(1)从恒星光谱中的星际分子CN, CH和 CH^+ 的吸收线求得激发这些分子谱线的背景辐射温度,在2.64毫米处为 $2.78 \pm 0.10^\circ\text{K}$,在1.32、0.559和0.359毫米处定出的温度上限分别为3.38、5.23和 7.35°K ;(2)用射电方法从星际甲醛(H_2CO)的2和6厘米的吸收线求得2毫米处的背景辐射温度为 $2\text{—}5^\circ\text{K}$;(3)大气外在火箭或气球上的红外观测(直接测量),最初在0.4—1.3毫米波段得到的红外辐射流量为 2.8°K 为黑体辐射的几十倍,后虽得到和 3°K 相符的结果,但未完全肯定。总之,在短波方面的情况尚未得到肯定的结果。解决这个重要问题的观测工具似已具备,可能今后几年会有完满的解答。

星际分子

早年通过恒星光谱的分析就发现了星际空间存在着CN, CH和 CH^+ 等分子。近年来,由于射电接收技术在分辨率和灵敏度方面的巨大进展,在毫米—厘米波段发现了各种各样的星际分子,包括复杂的有机分子;简单分子如OH, CO。复杂分子如 NH_2CHO ,

(CH_3),O等。到1972年底为止,已发现星际分子27种,其中有机分子有十几种。大多数星际分子云与电离氢区、超新星遗迹以及若干红外星成协,尤其OH和 H_2O 微波发射源往往同红外天体有联系,这对恒星形成的研究提供了重要线索。此外,1969年9月在澳大利亚落下的一颗陨石中,还发现有18种氨基酸,而“阿波罗”11号飞船从月球表层带回的岩石,经过分析也发现存在多种氨基酸。因此,进一步更广泛地探索宇宙空间以发现更多的复杂的有机分子,如氨基酸等,对生命起源的了解一定会有很大贡献。

再有,引力波探测近年来也相当活跃。1969年美国有人宣称已经探测到从银河系中心方向来的“不能排除是引力波”的信号。但确实与否,没有得到进一步证实。目前还有英国、西德、意大利、日本和苏联等国家在积极筹备开展这方面研究。

除了以上这些重要发现和比较活跃的领域外,天体物理学过去经常进行的一些研究课题也有不少进展。有的因为跟上上述新发现了联系而重新活跃起来,如双星及密近双星就是这样;有的因为对天体演化和宇宙论的研究有特别重要的作用,而一直为人们所重视,不断取得新的进展,如能够提供天体距离尺度和为恒星内部结构研究提供资料的脉动变星的研究,由于非线性脉动理论的成就,近年来又得到新的突破;至于为天体物理研究直接提供基本资料的观测研究工作,如恒星的视差、自行、视向速度和光谱分类等,从来就没有被忽视过。这些就不一一列举了。

这十年来,随着观测资料的积累,特别由于一些对天体演化有重要意义的新发现,天体演化学也得到了-定的进展。天体演化问题大致分为三类,即星系、恒星和太阳系的起源和演化。三类中,恒星演化研究最多,进展也比较显著。

恒星起源和演化的内容,简言之,是研究恒星的形成、发展和消亡的规律和历史。一般认为,恒星从星际弥漫物质凝缩成原恒星开始,经主序星(发展成熟的处于较稳定状态的正常恒星)、红巨星、红超巨星等演化阶段,最后根据质量大小分别成为白矮星、中子星和黑洞而结束它们的一生。恒星发光的能量来源是热核反应。在不同演化阶段,随着恒星内部温度、密度的升高,氢、氦、碳、氧的原子核相继轮替参与热核反应,供给能量。

从恒星内部结构的研究来探讨恒星演化,主要开始于五十年代。以前,只限于探讨个别恒星模型在赫罗图上的位置,如太阳的模型,红巨星的模型。此后,才开始探讨各种质量的恒星脱离主序后的演化。一般计算到红超巨星阶段。随着电子计算机的广泛应用,近十年来恒星演化工作又得到一次推动,推进到更晚期的演化阶段,主要对星族II星,从红巨星顶端落下,经水平支,又返回红巨星,确定了水平支的恒星模型。

上述理论结果可以和观测到的球状星团的赫罗图进行比较。由此获知球状星团的年龄约为一百亿年，恒星的氦丰富度以质量计占25—30%。此外，联系到赫罗图上星族I造父变星不稳定区，对于测定银河系尺度极为重要的经验周光关系也初步获得验证。因此，变星不是特殊类型的恒星，而是正常恒星在演化到某一阶段的特殊表现。

恒星进入主星序前的早期阶段演化，六十年代经林忠一郎的工作，指出整个恒星经历对流状态，而不是早年认为的辐射平衡态，有所突破。但还有重要问题需进一步探讨，即根据他的理论，在到达主星序前，恒星，例如太阳，处于准流体平衡态的初期，其光度为现在的千倍。这是很重要的，直接牵涉到太阳系的形成问题。此外，关于恒星形成之前的理论，尤其从弥漫物质凝聚成恒星的理论目前还很不完善，困难很多。

恒星演化的另一端，晚期演化，也有困难。虽然，恒星的归宿，从高密度方程、广义相对论的探讨，可推断它们为白矮星、中子星或黑洞，但从红超巨星到最后归宿这一段，从恒星内部结构来研究演化还是空白。这是因为在红超巨星阶段后期，恒星模型急剧变化，计算很困难，且工作量巨大，所以研究工作停滞不前。

关于恒星的起源，安巴楚勉认为，恒星不是由弥漫物质形成的，而是由超密状态下的物质形成的，超密物质存在于星系核中，由于星系核活动抛出大小物质团，小的形成恒星、星团，大的形成较小的星系。这种观点虽然以观测到的星系核爆发活动和星协膨胀等现象作为依据，但观测事实很不充分，而且对星前超密物质的性质和被抛出的超密物质所形成的恒星、星系及其各种系统如何得到很大的角动量等问题未有满意说明。

星系起源问题主要也有弥漫和超密两种学说。

弥漫说又有好些种。本世纪初金斯的引力不稳定学说，四十年代魏札克的湍流和阶式结构说，五十年代霍依耳的引力湍流说，都从不同角度说明大块弥漫物质逐级分裂，形成星系、星团和恒星等系统。此后，雷瑟提出了引力团聚说，和上面三种相反，认为是由小块逐级凝聚为大块物质，如水汽凝成水滴。

超密说即上面提到的安巴楚勉的学说，近年来它和大爆炸宇宙论挂起钩来，后者认为整个总星系是原始超密物质爆炸形成的。大小不等的散块形成星系团、星系、星团和恒星等，星系的谱线红移给出了向外膨胀的速度。

此外，玻依耳等的稳恒态学说，唯心地提出物质在密度最高区域，如星系核中创造出来，使宇宙膨胀时，其空间密度不变，保持稳恒状态。这个学说，理论上是站不住的，观测事实，如射电源的计数，也否定了它。

星系的演化，目前尚无确定的看法。早年认为从一个球状星系开始，由于自转而逐渐变扁，变成旋涡星系，最后变为不规则星系。可是，不规则星系和旋涡星

系含有较多气体和年轻的O、B型星，球状星系则缺乏这些天体；此外，一些旋涡星系的旋臂是旋闭的。从这两方面考虑，不可能从前者演变为后者。也有提出从后者演化为前者，这也有困难。因为，就动力学观点来说，怎能从扁体转化为球体呢！这是其一；其次，球状星系的质量为 4×10^{11} 太阳质量量级，而旋涡星系和不规则星系在 3×10^{10} 太阳质量量级，怎能由于演化而质量增加十倍！六十年代，霍姆贝提出上述各类星系间并无演化联系，认为在星系的一生中，它们的质量和体积不变，老化的唯一标志是颜色变红。这学说假定星系质量不变，和观测事实不符。

总之，对星系的起源和演化目前了解还很少：第一，不知星系的详细结构；第二，尚未获得确切测定星系年龄的方法；第三，不知星系怎样形成，这问题和宇宙论有关。不过，最近林家翘用物质密度波理论来解释星系的旋涡结构，取得了一定的成就。

太阳系的起源和演化问题，虽然长期以来一直是研究的对象，但这方面没有显著的进展。早年，拉普拉斯的星云说有两个致命的弱点。后来一些学说认为在太阳周围出现了纤维状长条，而假定太阳已和现在相仿。这种学说可以解释行星系统好些特征，如质量分布、轨道运动的规律性等。不过，凝成行星和卫星所需的时间远大于这种纤维状长条的寿命。此外，一百多年来，太阳系的角动量分布一直是一个未能满意地解决的问题。

为了克服上述困难，近年来提出的好些学说，就引进了湍流或磁场，甚而兼有两者。引进磁场的目的，是为了解决太阳系角动量分布问题，认为太阳的大部分角动量通过磁场的作用转移给形成行星的物质。

和以上设想不同，前几年有人提出超新星爆炸形成太阳系的学说。认为超新星爆炸时，抛出一些碎块，各自形成一个恒星及其行星系统，其中包括太阳系，认为只有这样才能说明今天太阳、地球上上面有这么多的重元素和放射性元素。

太阳是离我们最近的恒星，有大量比较确切的观测资料，这给研究太阳系演化带来某些方便。但由于太阳系是宇宙间无数行星系统中能直接观测到的唯一样品，且处在相当稳定、演变缓慢的阶段，这又是研究它的演化问题的一个困难。目前种种学说仍在假说阶段，都很不成熟。

天体物理学的内容极为丰富，近年来随着近代科学技术的巨大进步，它得到了飞速的发展。新发现一个接着一个，层出不穷。每一个新发现都是宇宙间物质运动矛盾的更广泛更深刻的暴露。而这些矛盾的解决又使人类对物质世界的认识前进一步。天体物理学的发展和其他自然科学的发展一样，雄辩地证明了“**在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的**”这一伟大真理。