

方兴未艾的粒子天体物理学

吴 中 光

(福建师范大学物理系)

众所周知,粒子物理学的研究对象是粒子,其尺度范围小于 10^{-13}cm ,质量小于 10^{-23}g ,是所谓的微观物理学。天体物理的研究对象是宇宙间的星体、星系乃至整个宇宙,其尺度范围大于 10^{19}cm ,质量大于 10^{39}g ,是所谓的宇宙物理学,然而,这两门研究对象完全不同的学科从80年代初开始却奇迹般地熔为一体,诞生了一门新学科:粒子天体物理学。

粒子天体物理学研究范围极广,例如:暗物质的本质;对来自太阳和超新星的中微子的观测;中子星附近的强大的加速机制的证据,以及关于对我们今天看到的数十亿光年的宇宙大尺度结构的形成起着重要作用的宇宙创生的量子涨落和拓扑结构的假设等问题,都是粒子天体物理学研究的范围。由于这一新学科的形成,天体物理的观测结果正用于解释粒子的属性,而同时粒子物理和实验技术把宇宙的耀眼部分和不可视部分展示出来。

粒子天体物理学可分为以下三个领域。

一、粒子物理和宇宙学

随着科学的发展,现在粒子物理学和宇宙学都已建立了自己的标准模型。下面先介绍这两种模型的情况,以便更好地理解粒子物理和宇宙学的协同发展。

(一) 宇宙演化的标准模型

以可靠的物理学规律为基础的宇宙学研究是在有广义相对论之后才开始的。宇宙的膨胀则是在1929年哈勃发现河外星系的运行规律后才逐渐被认识的。40年代末,伽莫夫等人以宇宙膨胀的观念为基础,建立了宇宙的热大爆炸演化模型,热大爆炸宇宙学的主要观测根据有以下4个:

1. 星系具有系统性红移,距离越大,红移越大;
2. 已知最老的恒星或陨石的年龄均不超过200亿年;
3. 宇宙间存在各向同性的微波背景辐射,相当于温度为3K的热辐射;
4. 各种天体上的 ^4He 丰度大体一样,约为30%。

了英国,引起了爱丁顿的极大关注。1918年,爱丁顿出版了有关广义相对论的专著,指出广义相对论引起了哲学、物理学和天文学的重大革命。

1919年的交通很不便利,由于战争,爱丁顿不得不绕路带领一支考察队赴巴西的索布拉尔,观测日食。拍摄到了日全食时的大量星像照片,由于怕在归途中发生什么不幸,对成功的照片立即进行了检验。将拍摄到的星像照片与太阳在别处时的同一星像比较后,显示出了位移,表明星光在掠过太阳时,光线发生了偏折。与爱因斯坦的计算值相符,从而验证了广义相对论,光线会在引力场中发生弯曲。

1974年底,美国的赫尔斯和泰勒在天鹰座发现了射电脉冲双星PSR1913+16,为广义相对论关于物质加速时以引力波形式辐射能量的预言提供了检

验。依据广义相对论所做的计算与在12年里仔细观测的结果一致。1993年,赫尔斯和泰勒因此而获得诺贝尔物理学奖。

科学文化只是人文文化中的一部分,科学文化还需要从人文文化中吸取精华。我国古代有很多关于宇宙生成的阐述和疑问,依然将是天文学以后研究的课题。

由于当时的经济技术和天文学的推动,17世纪物理科学成了带头学科,一直到今天。但是进展仍将继续,依然有待解决的问题,如暗物质问题、哈勃常数的大小、宇宙的未来、广义相对论中的奇点问题等。

科学没有边界,科学不是个体行为。科学需要人类的共同努力,需要后人继承前人的不懈追求。关注宇宙时空,其实就是关注我们人类自身!

现在,热大爆炸模型已成为宇宙演化的标准模型,目前还没有任何天文或物理的观测实验结果与热大爆炸宇宙学有矛盾。这种宇宙模型的基本观点是,宇宙整体起源于原始的奇性(时空奇点)或一个最初事件,那时温度(能量)极高,密度极大;随后,宇宙空间不断膨胀,温度不断下降;宇宙间的万物,就是在这不断膨胀冷却的有限时间里形成的。

热大爆炸宇宙模型,是一种彻底的演化模型,即一切事物都起源于原初的一种事物。宇宙的演化可分为4个时期:

(1) 创生期——最早的宇宙时期,相应的宇宙年龄小于 10^{-44} 秒,这是时空本身的形成阶段,应当用量子引力理论或量子宇宙学来描述这一时期的动力学。

(2) 极早期,是指宇宙年龄约为 10^{-36} 秒的时期,主要物理过程是发生大统一相变,以致宇宙膨胀极快,称为暴涨。此时,宇宙间的不对称也开始形成。夸克、胶子等粒子也是这一时期的产物。形象地说,这时期宇宙像一锅“夸克汤”。另外,由于此时宇宙的温度极高,能量很大,我们可以把它作为一个超高能的实验室。

(3) 早期,是指宇宙年龄约为 10^2 秒的时期,这是各种轻元素产生的时期,宇宙间的⁴He、D、Li等主要是在这个时期形成的,所以又称宇宙早期为核合成时期。

(4) 近期,当宇宙年龄约为10万年时,宇宙的温度已下降到4000K,宇宙变得“透明”(光子同其他粒子的相互作用锐减,通常称为光子退耦),同时原子形成。随后,由于引力的作用,宇宙从相当均匀的状态演化到有各种结构的状态。各种尺度的星体及星系,就是在这—时期中逐渐形成的。到现在,宇宙已冷却到约3K,其年龄约为150亿年。

(二) 粒子物理的标准模型

粒子间的相互作用,现在已知4种:引力相互作用、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用。其中电磁相互作用和弱相互作用已经证明可以统一为电弱相互作用。现在宇宙中所有的相互作用,似乎都能归结为这4种相互作用的组合,粒子可以按照它们参与的相互作用分为3类:

(1) 传递相互作用的传播子。这些传播子均为玻色子。光子 γ 传递电磁相互作用,中间玻色子 W^+ W^- 和 Z^0 传递弱相互作用。胶子(共8种)传递强相

互作用,以上3类传播子共12种,此外,理论认为应存在传递引力相互作用的引力子,但实验尚未发现它。

(2) 除传播子以外,不参与强相互作用的粒子称为轻子。已经发现的轻子共6种,轻子是基本粒子,目前还没有发现它们有内部结构的证据。

(3) 其余粒子均参与强相互作用,称为强子,强子不是基本粒子,它们由夸克组成。

现在人们通常把关于微观世界的认识,包括关于相互作用的理论和基本粒子体系称为粒子物理的标准模型,而把弱电统一理论和关于强相互作用的理论——量子色动力学统称为标准模型理论。到今天为止,实验上还没有发现与标准模型理论有矛盾之处,可以说,标准模型理论是十分成功的。

20世纪物理学的最令人激动的成就之一是证明了在更高能量或更高温度下,已知的4种相互作用趋于统一。弱作用和电磁作用在能量高于100 GeV时合并成单一的弱电相互作用。这样高的能量相当于宇宙在热大爆炸后约 10^{-10} 秒时的温度,高于室温的 4×10^{12} 倍以上,理论估计,在能量大约为 10^{15} GeV时,强作用将与弱电相互作用合并成一种大统一相互作用,当能量高于 10^{19} GeV时,4种相互作用将统一成一种相互作用。我们称为超统一作用。但是,要达到超统一、大统一相互作用所需的能量,是现有加速度可望而不可及的。要使加速器能量大到能检验大统一和超统一的程度,则加速器将延伸到最近的恒星乃至银河系中心,建造这样的加速器超过了最乐观的科学预测。然而,宇宙的极早

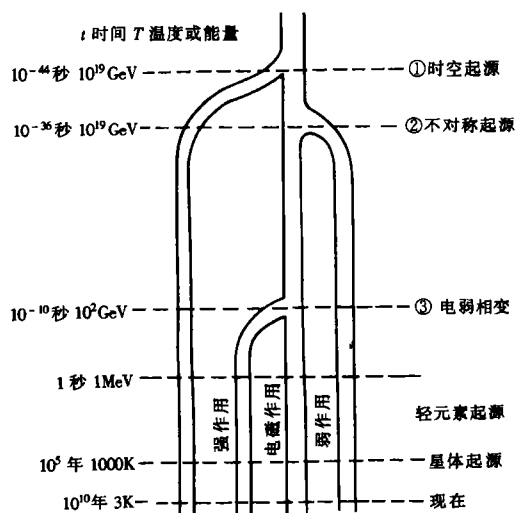


图1 宇宙的演化及4种相互作用的生成

期,温度极高,能量极大,能够提供大统一和超统一所需的能量尺度(见图1)正是这一简单的事实促使科学家们试图利用宇宙学的观测来验证粒子物理学的预言。因为极早期宇宙正如为粒子物理提供一个超高能“实验室”。那里发生过的某些物理过程会在今天留下遗迹。(详见表1)

表 1

宇宙时代(年龄)	遗留物
10^{-44} 秒	时空拓朴
10^{-36} 秒	大尺度非均匀性
3分钟	轻元素丰度
10^5 年	微波背景辐射
$\sim 10^{10}$ 年	大红移天体

因此,利用现有的猜测性的粒子理论来研究极早期宇宙,既有助于了解宇宙的演化,又能借此检验这些猜测性理论的正确性。这样,宇宙学不只是被动地等待粒子物理学的输入,它也能动地为粒子物理理论提供制约和鉴别。

(三) 磁单极困难和对称破缺相变

磁单极子(磁荷)的概念是20世纪30年代由狄拉克提出的。狄拉克指出,存在磁单极在理论上是容许的,而且有了磁单极子就可以很好地解释自然界的电荷为什么总是量子化的,即为什么总是电子电荷的整数倍。尽管狄拉克的理论非常美妙,可是长期以来许多人不相信真有磁单极子。然而,有关大统一理论及极早期宇宙的研究迫使我们不能根据感情上的好恶来“相信”或“不相信”磁单极子的存在。

按照热大爆炸宇宙模型,现今宇宙间存在的4种基本的相互作用也是逐一生成的。在宇宙创生期附近($t \sim 10^{-44}$ 秒),宇宙间只有对称性极高的统一的一种相互作用(称为超统一)。随着温度的降低,逐步发生各种真空相变(对称破缺),这才逐一产生各种相互作用(如图所示)。1974年,特霍夫特和玻利亚科夫分别证明,在大统一理论中,存在磁单极子几乎是必然的。这是由希格斯场的真空自发破缺机制决定的。宇宙极早期要经历大统一相变,必然有磁单极子产生,根据热大爆炸宇宙模型,今天磁单极子密度 n_m 和重子数密度 n_b 之比为 $n_m/n_b \approx 10^{-2}$, 这个比数非常大,但今天我们连一个磁单极子也没有看到,所以理论估计和实验观测之间存在极突出的矛盾。这就是宇宙学面临的一大困难,即有名的“磁单极子短缺问题”。

为了解决这个困难,尤斯于1980年发展了暴涨模型,其基本思想是,宇宙在大统一相变时,其空间有极快的膨胀,因为相变时,一些标量场真空能量值不等于零,保持常数,当宇宙演化到其温度低于大统一相变的临界温度时,真空能量可以像相变潜热一样释放出来,此时宇宙的能量主要以真空能量为主,在真空能量为主导的情况下,宇宙的膨胀要比通常的热大爆炸中的膨胀快得多。在不到 10^{-30} 秒内,半径增大了 10^{28-30} 倍,使宇宙比暴涨之前的因果体积增大了约 10^{80} 倍,从而使产生的磁单极子的密度变得很小,以致于我们今天观测不到它。我们今天找不到磁单极子,不是由于它在原则上不能存在,而是因为宇宙一直没有为磁单极子的生成提供条件。尤斯把场论中对称破缺相变的思想同宇宙学相结合发展而成的暴涨模型,成功地解决了磁单极子短缺的困难。

(四) 非重子暗物质

暗物质问题是目前粒子物理与宇宙学相互关联的最好例子之一。通过数十年的天文观测,我们可以确信在宇宙中大多数物质是不发光和透明的,我们称它们为暗物质。暗物质是用任何现在的望远镜或其他观测仪器所不能看见的。按常规的天体物理概念,人们容易设想,这些暗物质是一些非常暗的星,为行星、小恒星、冷却了的白矮星、中子星和黑洞以及弥漫在宇宙中的尘埃等,它们均由重子组成。然而,按宇宙学核合成理论,重子物质对密度参量 Ω 的贡献不到0.1,而宇宙学给出的 Ω 应该是1,这就要求宇宙中约有90%的物质是非重子类的。因此,宇宙学要求暗物质应是非重子类的。那么,暗物质可能是什么呢?这只能从粒子物理中寻找答案。

能在宇宙演化了100多亿年后仍大量存在的物质必须是由稳定的或寿命极长的粒子构成的。从已发现的粒子中能找到的候选者只有中微子。除中微子外,其他的候选者只能从粒子理论所预言而尚未被发现的粒子表中去寻找了。现在理论工作者提出两种候选粒子:轴子和“WIMP”粒子。轴子是理论上为保证强作用CP守恒而引入的一种标量粒子,“WIMP”粒子就是参与弱作用的大质量粒子。它们的共同特点是相互作用极其微弱。如果这些如今只存在于理论家想象中而尚未在实验室中露面的粒子竟然是宇宙中的主角,那当然是一件很富有戏剧性的事。

非重子暗物质问题至今仍是谜,但是,我们已经看到要解开这个谜,需要粒子物理和天体物理的协作,同时也会给粒子物理和天体物理带来突破性进展。

二、粒子物理与恒星物理

恒星天体物理同粒子物理有着复杂而密切的联系。例如,中微子在恒星和超新星中大量产生,这些中微子可借用粒子物理和核物理中的技术乃至设备来检测。这两个学科间的关系是协同的,它们的结合不仅为粒子物理学研究中微子提供了机会,而且也为天体物理学家提供了基本信息,下面简介中微子天文学的发展情况。

日本、美国、欧洲等几个天文观测站成功地收到来自超新星 1987A 的中微子,这件事可以看成河外中微子天文学诞生的标志。

从中微子天文学中,我们可以获得许多光学望远镜不能得到的知识。例如,虽然用光学方法能看到超新星爆发,但不能探知超新星内部的引力坍缩,也就不能获得恒星演化这一特殊时期其内部的信息。用中微子天文学则可进行这项研究。因为中微子是弱作用粒子,它有较强的穿透本领,哪怕是星体核心产生的中微子,也有可能不经碰撞地穿透到星体之外。这种中微子携带着丰富的有关星体核心的信息。

利用接收到的来自超新星 1987A 的中微子,就可以推知其核心引力坍缩后的温度。其方法和光学天体物理相同。因此,根据中微子的平均能量(4MeV),我们可解出相应温度,即大约 100 亿度以上。这完全符合关于引力坍缩的理论推断。这是中微子天文学的第一项成就。

事实上,在此之前中微子天文学已颇有名气。这就是太阳中微子短缺疑难。太阳中心的核反应也会放出大量电子中微子。对此,在地球上也是可以测量的,特别因为太阳的光度等有很准确的测量值,所以根据太阳物理对太阳中微子的预言也是很准确的。太阳的光度为 3.86×10^{33} 尔格/秒,中微子强度应为 1.8×10^{38} 个/秒(理论预言值),落在地球上的流强应为 6.6×10^{10} 个/秒· cm^2 。美国布鲁克海文实验室进行了太阳中微子探测,探测的结果只是理论值的 25%,这是一个严重的矛盾。

目前,解释这个矛盾最成功的模型是中微子振荡模型,即不同种类的中微子之间可能发生转变。太阳核心所产生的电子中微子在通过太阳物质飞出

太阳时,有相当部分已转变成 μ 中微子,以至发生电子中微子短缺。需要指出,中微子振荡模型目前还只是一种理论猜测,缺乏确切的实验证据。当然进一步的观测检验正在着手进行中。

由此可见,太阳中微子的短缺,不仅推动着粒子物理学理论的发展,而且也将推动其实验技术的进步,现在物理学知识不仅可以从地球上的实验室获得,同样也可从宇宙、天体这个有效的独特实验室获得。一个总的趋势是天文观测和物理实验之间的相互渗透越来越多。研究中微子时,天文观测站与物理实验室已合二为一了。

三、高能天体物理与粒子物理

高能天体物理与粒子物理有着直接的联系。一方面,粒子物理拓宽了天体物理中的中微子源和更高能量的宇宙线的观察范围,并为天体中的加速机制的研究提供了线索。另一方面,在宇宙线中发现的极高能量(10^{20} eV 以上)的粒子也能为我们提供在这一能量上的粒子间相互作用的信息,因为人造加速器要达到这么高的能量是不可想象的。事实上在高能加速器问世之前,宇宙线作为唯一的高能粒子源导致了许多基本粒子的发现。现在,超高能宇宙 γ 射线的研究已成为天体物理学家和粒子物理学家共同感兴趣的领域。

综上所述,宇宙学、高能天体物理的研究离不开粒子物理学,而粒子物理学又在对宇宙学及高能天体物理的研究中获得制约和启示。虽然已取得的成就尚不太多,但我们相信,在揭开宇宙之谜的过程中,粒子物理和天体物理之间的这种协同关系一定会发挥更大的作用。

科苑快讯

南非开始建造大型望远镜

2000 年 9 月初,位于南非开普敦东北约 400 千米萨瑟兰镇的南非大型望远镜(SALT)开始建造。SALT 是南半球最大的望远镜,定于 2004 年底完工,其设计与美国德州戴维斯堡霍比-埃伯利望远镜相似。SALT 可观测南半球近 70% 的天空,能从南半球对诸如银河系的中心及其相邻的两个星系和麦哲伦星云等许多重要天体进行观测。SALT 的建造与头十年的运行经费约为 3000 万美元,其中的 38% 来自南非政府,其余部分来自国外。

(卞吉 秦宝 编)