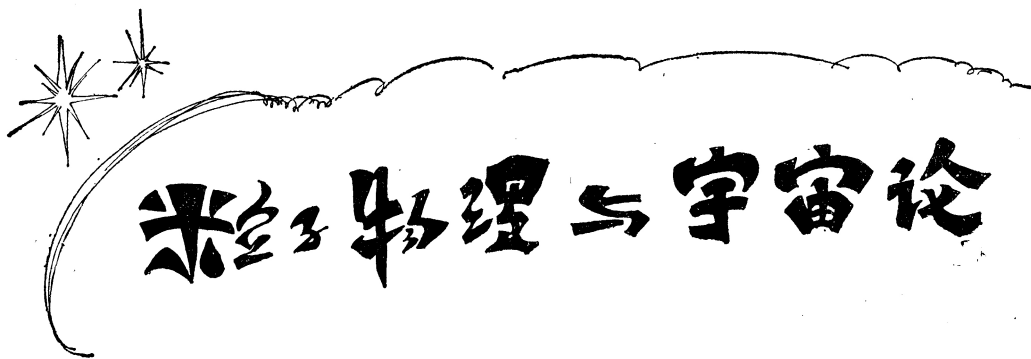




粒子物理与宇宙论

研究无限小的粒子物理和研究无限大的宇宙论的结合是理论物理学家们敢于攻克的一个新课题。前些时候，西欧快报曾发表了著名的宇宙论物理学家史蒂芬·霍金撰写的有关粒子物理的文章，在此让我们再看一看西欧粒子物理学家约翰·艾利斯和迪米·那诺波洛斯是如何从另一个角度研究宇宙论的。

人们可能认为在无限小和无限大这两类科学之间没有什么共同点。然而，在过去几年里，粒子物理和宇宙论二学科之间的联系却日趋紧密了。一些粒子物理学家现在十分关注对遥远气云中的轻元素丰度的观测，而一些宇宙论学者却急切地希望知道 Z^0 玻色子的衰变率。那么，宏观物理和微观物理之间产生这种共生现象的原因是什么？它们的发展情况又如何呢？

粒子物理和宇宙论这两门学科的最新发展加速了它们的结合。在过去几年里，这两门学科都分别建立了各自的“标准模型”。在粒子物理中，标准模型就是各种夸克和轻子之间的强、弱和电磁相互作用的规范理论。它把量子色动力学(QCD)和格拉肖—萨拉姆—温伯格模型结合在一起。虽然它成功地解释了从基本粒子物理实验中得来的所有数据，但这一标准模型仍未能回答很多老问题并且还存在很多新问题。如：究竟存在着多少夸克和轻子？为什么基本粒子的质量取所观察到的值？为什么强相互作用强，弱相互作用弱？理论物理学家们正进行多方探讨以寻求解决这些问题的答案。他们探讨的共同点都是推测可能存在着只有很弱相互作用的轻粒子，这种轻粒子在加速器实验中难以产生和探测；还推测可能存在着很重的新粒子，但他们的产生需要一台大的足以耗尽世界上所有金钱的加速器。理论物理学家们只能求助于唯一不受经费限制的“加速器”。——宇宙“大爆炸”，就不足为奇了。

根据宇宙“大爆炸”标准模型，人们可以把现在宇宙中正在扩展的遥远物体的“哈伯”流倒推回到比现在宇宙中的物质要热得多、密集得多的时代。如果没有新的物理规律起作用，这种倒推可以一直追溯到普朗克时代，那个时候宇宙中的粒子能量量级是 10^{19} GeV (10^{19} 千兆电子伏)。在这个能量上引力作用将是十分重要的。这些能量很可能在“大爆炸”的头 10^{-43} 秒内

就达到了，后来宇宙由于膨胀而冷却了。除去当今的哈伯膨胀，“大爆炸”模型还有两个最重要的、有力的证据：一是对 3°K 微波背景辐射的观察，通常认为它只是比当今宇宙小一千倍，热一千倍的那个时代的遗留物。在那个时代万物都是电离了的。人们把微波背景中的光子解释为是从那个时代起宇宙冷却后的遗留物，电离了的原子核和电子结合成中性的原子，从而遍布我们所熟悉的整个世界。另一个证据是宇宙曾比现在小 10^9 倍和热 10^9 倍。这一观察表明宇宙中大约四分之一的物质是 ^4He 的形式，而只有百分之几可能是在星球中生成的。人们普遍认为 ^4He 是通过“大爆炸”头三分钟的热核反应，从中子和质子及其它一些少量的轻原子核生成的。尽管这样一个认识上的飞跃还没有为直接的实验所证实，但“大爆炸”模型的这些成功已经激起物理学家们进一步向“大爆炸”的纵深推进 10^{18} 倍，当时典型的粒子能量大约是 10^{15} GeV。

“大爆炸”的理论是非常成功的，然而它也有许多没能解决的问题，同时还提出了一些新问题。为什么宇宙会这样大，这样老？宇宙最初的密度肯定被很精细地调节了，从而使它能够在比普朗克时代还久 10^{40} 倍的时间里生存下来并膨胀成今天这个样子。的确，宇宙仍旧是很平直的，其密度非常接近于临界值，这可能会使它在“大崩溃”中又一次坍缩。为什么宇宙几乎总是均匀的和各向同性的呢？宇宙中过去因果上互无关的区域似乎是完全等同地发展着，这可从微波背景的均匀性看出。在另一方面，导致星系和今天宇宙中其它结构的小的扰动是从那里起源的呢？宇宙中所有物质的起源是什么呢？宇宙中可见的物质中每 10^9 或 10^{10} 的光子里面都含有一个质子或中子，很明显不存在任何大的反物质群。在宇宙中存在着象中微子那样形式的轻的和作用很微弱的隐藏物质吗？“大爆炸”理论预测应该有与光子同样数目的中微子存在。在这种情况下，如果中微子比几个电子伏还重的话，宇宙中绝大多数的质量将以中微子的形式存在。中微子在宇宙构成中起到重要的作用吗？大量的中微子或其它轻的，作用很弱的粒子可能有助于宇宙中扰动的发生，包括星系本身。到底存在着多少种轻粒子呢？答案不仅

与研究星系构成的理论有关而且与对宇宙中 ${}^4\text{He}$ 的核合成的计算也有关。

上面对宇宙论问题的叙述揭示了它与粒子物理的很多重要关系,其中有些并不需要在时间和能量上做大胆的外推。宇宙核合成的计算对一兆电子伏特以下的粒子种类数十分敏感,因为这些粒子的热能密度可能会加大宇宙在核合成时期的膨胀率,从而增加 ${}^4\text{He}$ 合成的效率。为使轻粒子质量低于宇宙观测质量的四分之一,象中微子那样的轻粒子不应多于三种或最多是四种。早已知道了电子中微子, μ 子中微子和 τ 中微子,所以余地并不多。粒子物理学家们迫切希望这一结论得到证实,因为这将回答他们的一个基本问题,即究竟有多少种夸克和轻子。在这方面,宇宙论做的要比粒子物理实验好的多,因为目前有关中微子数目最好的实验限制来自 J/ψ 介子的衰变,竟有几十万种!未来的正负电子湮没和重的夸克-反夸克束缚态、 τ 粒子衰变实验可能会改变这一限制,正如带电 κ 介子的衰变实验一样,虽然会有更大的不肯定性。然而,可能只有对 Z^0 粒子衰变到不可观察的中性粒子衰变率的测量才能证实宇宙论对中微子数的限制。

轻于一兆电子伏的中微子在核合成以后衰变或湮没是会有困难的,因为这将与天体物理或宇宙观测,如微波背景辐射相抵触。如果中微子确实是稳定的,他们的质量一定会低于大约 100 电子伏,否则他们的质量密度会超过观察到的宇宙密度极限。鉴于对 μ 子中微子和 τ 中微子质量的最好实验限度分别为大约 300 千电子伏和 200 兆电子伏,因此不能不说这个宇宙论的质量的下限是一大进步。最近有迹象表明电子中微子可能为 30 电子伏。如果真的如此,它的宇宙论含义将是十分深远的,中微子将是宇宙中物质的主要形式,他们的引力摄动可能早已是星系形成的根源。他们可能会使星系形成的一些理论与微波背景辐射均匀性协调一致。根据绝热摄动的理论,物质和辐射是同时变化的,统一描述重子的大统一场论支持这些理论。关于大统一场论,我们以后还会提到。在不存在有质量的中微子的情况下,等温摄动论给出微波本底是自然平滑的,这点不利于绝热摄动论。最近的一些天文物理观测结果有利于有质量中微子的绝热摄动模型,根据这一模型星系应该是扁平或弦式排列的。粒子物理学家们,包括在西欧中心使用低能中微子束的那些学者们,都在焦急地等待有关中微子质量实验的新消息。

在宇宙中可能还有其它轻的、中性的、作用微弱的粒子,它们成团地漂流在宇宙中。很多以超对称为基础的理論预言存在着轻的、中性引力微子、光微子和黑格斯微子,它们分别是引力子,光子和黑格斯粒子的超对称伙伴。在核合成期间和今天,他们可能会比中微子少,质量可能会达到一千电子伏。在这种情况下,他们可能有助于个别星系的形成,星系标度上的质量丢

失可能也要“归罪”于他们。高于几个千兆电子伏的稳定中性粒子与宇宙论也是协调的,因为他们中的大多数在宇宙核合成之前都可能已经湮没了。这种较重的中性粒子存在的证据也可以在西欧中心的质子-反质子对撞机上和正负电子湮没中寻找。

至此我们主要讨论了粒子物理与宇宙论的联系,包括已有了观察证据的“大爆炸”时代。现在我们将追溯到宇宙核合成之前,当宇宙比它现在小 10^{12} 倍,热 10^{12} 倍的时代。人们相信就是在这一时期宇宙完成了从胶子,夸克等离子体到现今我们所熟悉的强子的过渡。这一过渡期间所产生的摄动和激波可能触发了星系的形成。因此,推测可能存在“夸克星”的天文物理学家和宇宙论学者对于夸克-强子相变的实验是非常感兴趣的。用未来的重离子加速器做这种实验是可行的。

把宇宙温度再往上推 2—3 个数量级,我们来到了格拉肖—萨拉姆—温伯格弱作用统一场论向低能和温度破缺相过渡的时代,这是我们今天所知道的。在这个时代以前,基本粒子的标准模型可能会是一个精确的对称性,进一步扩大对称性必然涉及关于基本粒子相互作用的统一的推测。我们已经提到了超对称的可能性。前面介绍的有关基本宇宙问题的很多最有趣的思想都与强、弱和电磁相互作用大统一的推测有关。

标准模型是不能令人满意的,因为它有三个独立的规范群因子 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$,每个都有它自己的规范耦合,其构成就显得不紧凑。最终,人们会喜欢一个具有普适规范耦合的理论。粒子物理的其它很多标准模型也无法解释。例如,为什么电子和质子的带电是在 10^{-20} 的精度上,大小相等而符号又相反呢?这一点正为不同的星系之间静电引力和斥力的不可探测性所证实。还有,标准模型并没有暗示夸克和轻子之间的联系,而这种联系可以从它们有相近质量的三个以上的家族的出现看出来。乍看起来,要把强、弱相互作用统一起来似乎很困难,因为他们的耦合大小是这么的不同。然而重整化群已使粒子理论物理学家能计算这些耦合常数如何随测量的实验能量变化。由于这个耦合常数能随能量标度对数性地变化,如果没有新的物理规律起作用的话,强相互作用和弱相互作用耦合碰到一起时的能量,高得可以天文标度来计算,也就是约 10^{15} 千兆电子伏。幸好这个能量标度还明显的低于普朗克标度 10^{19} 千兆电子伏(在此能量上量子引力作用变的十分重要),所以在一开始试图统一强、弱、电磁相互作用的时候有可能会忽略引力的作用。这种最简单的大统一理论是以对称群 $SU(5)$ 为基础的。

在所有这类理论中,电荷嵌入非阿贝尔群表明电荷被量子化了,因此电子和质子的电荷大小严格相等而符号相反。这也表明磁单极子的存在,而这方面更不清楚了。用大统一理论可以计算弱中性流混和参

数(温伯格角),简单模型的预言也与实验数据相吻合. 夸克和轻子被安排在大统一群的同多重态中,它暗示了夸克和轻子之间质量的关系. 比如,只有六个夸克,根据大统一理论,那么大约 1.8 千兆电子伏的 τ 轻子质量就表明有一个质量大约是 5 千兆电子伏的“ b ”夸克,这与实验也是一致的. 这样一来,大统一论者对宇宙论学者提出的可能只有三种中微子,因而有三代包含 6 种夸克的说法也感到利益攸关. 大统一理论把夸克和轻子归进同一多重态,因为他们期望会有新的相互作用促成夸克-轻子的转化,从而导致重子衰变. 用最简单的模型,占主导地位核子衰变方式会产生一个正电子和一个 π 介子,其寿命约为 10^{30} 年. 最近的一项实验还没有找到这种衰变方式. 大统一论者并不灰心,因为在超对称大统一理论里,最自然的预测当属一个反中微子和一个 κ 介子,而这种方式还有待于进一步仔细研究.

当我们把大统一理论应用于宇宙论时,我们必须外推至比核合成时代还热 10^{18} 倍的时代. 我们在那里都发现了什么呢? 当一位诗人听到所有的物质都会发生衰变时,他会对这些物质到底是怎么产生的感到奇怪. 大统一理论使夸克也使重子物质以多于反物质的方式而聚合,这种设想是萨哈罗夫提出来的. 违反重子数 B 守恒,电荷共轭 C 和电荷-宇称 CP 守恒的相互作用一旦脱离热平衡,它就可以使一个起初对称的宇宙进入一种物质多于反物质的不对称的状态. 一个自然的大统一理论图象就是超重的玻色子或费米子脱离平衡而衰变. 如果大统一理论标度大大低于 10^{14} 千兆电子伏,夸克的不对称合成就不能成立. 大约在夸克-强子相变的时代,所有的反夸克将为夸克所湮没从而形成介子、光子和轻子,剩下的小部分物质变成今天宇宙中可见的物质. 因此人们会很自然的推测所需要的电荷-宇称(CP)破坏,可能与在中性 κ 介子中观察到的有关. 但这又似乎是不可能的. 然而,预言存在足够大的物质-反物质不对称的很多大统一理论也预言中子电偶极矩可能大的足以被观察到.

以上是由大统一理论得来的关于宇宙论方面的好消息. 但事情有它另外的一个方面. 大统一磁单极子就是个令人头痛的问题,因为常规的“大爆炸”宇宙论使人难以理解在大统一理论中在每个有因果关系的空间范围内如何产生少于一个的单极子. 鉴于单极湮没不是非常有效,这就预示着当今存在比宇宙质量密度

和星系磁场所容许的限度多得多的单极子. 此外,最近发现大统一单极子可能会以猛烈的速率催化重子衰变,而这与对 neutron 星的观察结果不符,除非单极子的通量很低. 这个单极子问题有助于促使理论物理学家们去思考宇宙暴胀问题.

在大约 10^{15} 千兆电子伏温度以上的大统一理论对称破缺是在相变时发生的. 有可能是正在冷却的宇宙被困在一个有很大能量的“假”真空而变得过冷. 真空能量也许会使宇宙在迪·茜特相按指数膨胀直到这个相变完成为止. 这个指数膨胀也许能解释宇宙现在的巨大和为什么它几乎是平直的,以及它的质量密度非常接近于最终用“大崩溃”结束其膨胀时所要求的密度. 不幸的是,从暴胀宇宙的原始的观点出发,很难理解这个相变是如何在几乎没有不均匀性和单极子的情况下,如何有条不紊地完成的.

后来人们认识到如果大统一理论黑格斯势是相当平直的,那么每个真真空的泡在形成之后都会按指数膨胀. 足够的膨胀将意味着我们整个宇宙的起源是一个单泡,而最近的单极子也可能与我们相距 10^{10} 光年以上. 初看起来,这样一个泡宇宙很可能会是十分平直的、均匀的、各向同性的,就象一个已经膨胀起来的汽球的表面. 当理论物理学家们研究了这样一个新的暴胀宇宙中的摄动光谱后,他们发现几乎不能用距离标度来衡量,就如天文物理观测所证实的那样. 不幸的是摄动量太大了. 此外,要使大统一场论黑格斯势平直的足以适应于暴胀,还需要精细的调节参数,而这在常规大统一理论中是不自然的.

这两个问题在超对称理论中都可以避免,它使摄动量和势平直度可以任意调整. 虽然这些调整在技术上是可行的,当相变的温度低于 10^{16} 千兆电子伏时,他们就变的越来越精确. 正因为这个原因,考虑到发生在大统一理论相变之前原始暴胀的可能性是有趣的. 在这种情况下,单极子比起现在的天文物理上的限度来也并不很少. 原始暴胀图象的进一步发展需要解决引力问题,这又是另一个长远的探索.

粒子物理和宇宙论的研究是一个正在迅速发展的、充满活力的领域. 很多粒子理论只能用天际中的“大加速器”来检验. 这很小与很大之间的联系将进一步激励我们去探索未来.

(许满圈 译 杜东生 校)