

从粒子到宇宙

童 国 梁

从超新星 1987A 谈起

1987年2月23日,在地球上探测到远离它17万光年的大麦哲伦星云发生的一次能量为 10^{27} 倍的氢弹爆炸能量的超新星爆发,这次爆发后来被称为1987A.这是自1604年开普勒探测到的这类爆发以来人类第一次可由肉眼观察到的超新星爆发.由于核燃料的耗尽,在自身强大引力的作用下,星体在几秒钟的时间内坍缩,并释放出成百倍于我们太阳在它现存的时间内发出的全部能量.

在加拿大天文学家在智利的山上注意到超新星1987A之前,就传来了中微子在美国和日本的两个巨大的地下粒子探测器被记录的消息.这些探测器均由几千吨非常纯净的水组成,并配以光电倍增管和电子学.当初建造这些探测器时的目的是为了检验质子是否是稳定的,或者说,它们是否会发生即使是非常缓慢的衰变.但他们最终也没有探测到质子衰变,却探测到了超新星中微子.他们测量到的中微子流强可与超新星爆发的理论预言相比,这就令人信服地确认了我们对超新星的理解.超新星中微子的探测不仅为这些粒子和星体坍缩提供了重要的信息,而且也生动地证明了天文学与粒子物理学之间的相互影响.

基本粒子

经常阅读本刊的读者可能都已经知道,构成物质的基本粒子可以分为两类:夸克和轻子.夸克是构成包括质子和中子在内的一切强子的成分.夸克有6种,即u、c、t、d、s和b;夸克带分数电荷,前3种带 $2/3$ 质子电荷,后3种带 $-1/3$ 质子电荷.轻子也有6种,3种带电

轻子,它们是电子、 μ 子和 τ 轻子;还有3种与带电轻子对应的中性轻子,即电子中微子、 μ 子中微子和 τ 子中微子.当然,如用更专业一点、更严格一点的说法,那么,上列各种基本粒子都有自己的反粒子;而且,对夸克来说,每种夸克由其“颜色”不同又分成3种.它们都是基本粒子.

基本粒子的质量差别很大,中微子的静质量几乎为零,而t夸克的质量比质子还大180多倍.

除了上述的基本粒子以外,物质世界中还存在电弱相互作用的传递子光子、 Z^0 、 W^\pm 以及传递强相互作用的胶子,胶子有8种.

从现代物理学的观点,呈现在我们面前的大千世界就是由这些基本粒子构成的.

大爆炸(Big Bang)

谈到宇宙起源问题,人类历史上曾经出现过不少种理论和假想,但是现代人们普遍接受的则是大爆炸理论.本文将从粒子物理学的观点来阐述大爆炸以来宇宙的演化.

大爆炸约发生在120亿年前(也有的说更早,200亿年前),并导致了宇宙的产生.早期的宇宙简直是难以置信的,一锅原生的稠密的基本粒子汤,这些粒子(光子、夸克、轻子、 W 、 Z 、...)在极高的能量下重复碰撞,呈现为一团灿烂的焰火.

今天粒子物理学已容许我们重现早期宇宙的某些条件.这里我们用一张相当简单的图来反映宇宙演化的历史.图1就是这样一张反映了从大爆炸至今的宇宙演化历史的简图.

图上右边的Y轴表示宇宙温度,以开氏温度为单位,底上的X轴表示大爆炸开始后的时间,以秒为单位.在该图上,X和Y轴均以对数制表示.左边的Y轴表示每个粒子的平均能

中国科学院高能物理研究所 北京 100039

量,这是与温度成正比的. 顶部的 X 轴表示宇宙的能量-质量密度,以相对于地球上的水密度作为等价质量单位. 大家知道,质量本身也是能量的一种表现形式,它们以著名的质能公式 $E = mc^2$ 相联系.

在欧洲核子中心 (CERN) 的大型正、负电子对撞机 LEP 和美国费米实验室的质子-反质子对撞机 Tevatron 上,每个基本粒子(夸克或轻子)平均约有 100GeV 的能量,这样的能量相当于大爆炸后 10^{-11} 秒后宇宙的温度,即 10^{15} K. 这时,所有的基本粒子甚至中微子彼此都处于十分理想的平衡之中,湮灭与产生也是平衡的. 那时宇宙包含的光子比夸克多得多,并且每个夸克或轻子的能量也比它们的静止质量大得多,这时的宇宙也被准确地描述为辐射为主状态. 在宇宙膨胀过程中,它拉长了辐射的波长,使得光子的能量变小. 宇宙开始时既热又密,接着就一边膨胀一边冷却. 图 1 的右上顶端的 LHC(Large Hadron Collider),即是正在 CERN 计划花资 18 亿美元建造的大型强子对撞机,7TeV 能量的质子和 7TeV 能量的质子对撞. 从图 1 可见,LHC 可以达到比 LEP 和 Tevatron 更高的温度、更大的密度以及更接近大爆炸的初

始时刻的条件. 现在让我们顺着图 1 跟踪这段温度变化历史,看它是如何最终导致今天这个世界.

湮灭

在大爆炸后 10^{-6} 秒左右,基本粒子的平均能量降到几十亿电子伏特(即几个 GeV),夸克可以结合成为强子,略后又变成稳定的质子和(相对稳定的)中子. 到了约 1 秒时,虽然密度仍然比水高几十万倍,但是中微子的碰撞已变得稀有,它们不再与其他粒子处于热平衡并有效地从其余的物质和辐射中离开. 又过了几秒钟,当能量降到兆电子伏特(即 MeV)水平,这时,电子和正电子不能再被产生,并在总体上发生正、负电子湮灭,湮灭剩下的足够的电子平衡了质子的电荷.

一些质子和中子结合成氘,然后变为 α 粒子,这过程一直进行到密度和碰撞率降得太低时为止. 任何未结合的中子在接着的几个小时中发生衰变. 今天可以测量的氘和氦的含量是那时条件的一种灵敏试验,因而也是大爆炸模型的灵敏试验. 此时,也可以合成一点儿锂同位素. 这种核合成约发生在大爆炸后的 3 分

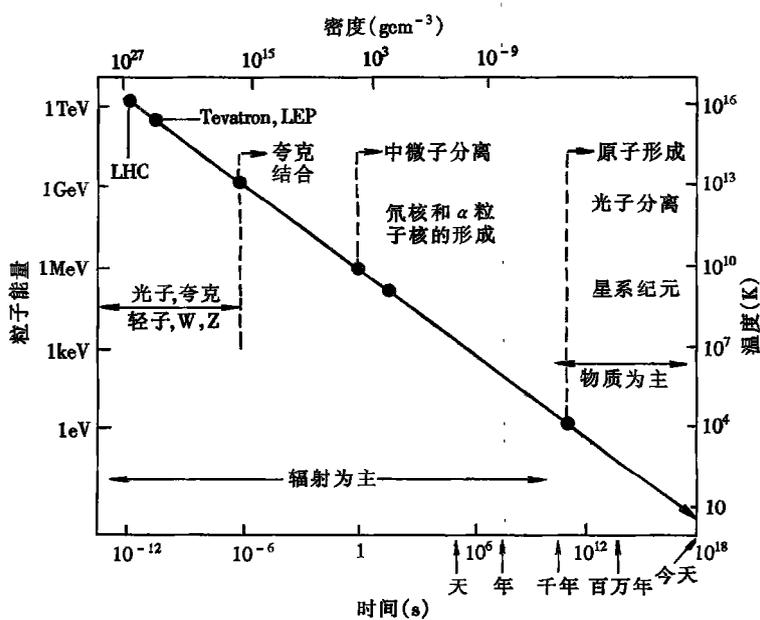


图1 宇宙演化图

钟。

又过了 30 万年, 温度降到 10^4K , 也即平均能量降到了 1 电子伏特(即 1eV), 这样的能量已低于原子的电离势, 氢和氦的中性原子开始形成。光子不再由于与物质频繁的相互作用(这种相互作用使光子结合在带电粒子上)而受到阻止, 光子从物质中分离出来, 从而使宇宙由不透光变得透明。此后, 主要的能量密度是以物质的形式出现(这里所说的物质, 也包括性质尚未被确定的暗物质), 而以前, 则是以辐射形式出现。不过, 即使在物质为主要的时代, 从图 1 上仍可以看到辐射的存在。随着宇宙的膨胀, 这种辐射现在已冷至 2.7K (也即 -270°C), 也即所谓宇宙微波背景(CMB)。我们周围充满了这种背景辐射, 造成了我们所用的电视机噪音 1% 噪音的来源。

恒星物质

当 CMB 于 60 年代发现之时, 它是非常均匀地穿越天空的。直到 1992 年, 宇宙背景探索者(COBE)卫星才发现了十万分之一的温度变化(或称波动), 也即 CMB 上有一点点各向异性。CMB 的温度图像构成了宇宙非常年轻时的瞬间图象。这些波动反映了原始粒子汤的微小的密度涨落。密度涨落因引力作用形成星云, 后来又成为银河和星系。就这样, 天文学的研究对象最终出现在图 1 的右下角。最初的一些恒星仅是由氢和氦两种元素组成, 但在恒星核心处发生的聚变和其他核反应产生了所有其余的元素。恒星的质量愈大, 其寿命愈短。一些如超新星那样的爆发又以这些化学物质污染了局部宇宙, 并对以后的星体, 包括我们的太阳和太阳系元素的混合做出了贡献。在地球和我们身体中的每一个碳和更重的原子核都是在已爆发的恒星中心产生的。所以可以说, 我们全是由恒星物质制成的。

宇宙学正在变得愈来愈精确

直到如今, 宇宙论的测量都是与大爆炸膨胀符合的, 而与引力吸引相反。根据宇宙

的平均质量-能量密度, 这可能导致继续膨胀或最终的收缩: 大压缩(Big Crunch)。应该指出, 大多数宇宙论的测量都是粗糙的。几年前, 测量表明, 宇宙的年龄比一些星体小, 但是, 由于观测的不确定性, 即使差上两倍也不用太在乎。

近期观察的精度正在大大改善。去年来自两个合作组的观察结果表明宇宙膨胀可能实际上正在加速, 非常远的超新星比预期的暗淡, 这就表明它们比红移所暗示的离得更远。对超新星分析的仔细检查正在进行, 并且现有的望远镜已可以观测更远的超新星。

CMB 的涨落正在以更高的精密度在较小的角度标度下测量。Boomerang 实验将一台微波望远镜带上天空并在南极上空进行长期气球飞行, 首次得到了高分辨的大范围天空的 CMB 图像。接下去又有 NASA 的 MAP 卫星飞行。精密宇宙学时代已经趋近, 并且它与粒子物理学的共栖将在这个新世纪中导致更令人激动的科学。

读者朋友们, 当您读了这篇介绍后, 我想您一定会感叹人类对自然的无限认识能力, 当然也一定会十分庆幸我们拥有自己的如此美好的家园——地球, 因为从各种意义上来说, 这些都是非常偶然的。可不是吗?

储存核废料的新材料

来自美国、英国和日本的科学家们已经找到了一类可以用于长期安全储放射核废料的物质。据文章第一作者 Kurt Sickafus 介绍, 目前高浓度的核废料, 比如核反应堆用剩下的废燃料, 所存放的容器大约只能维持 100 年左右的时间。但是长期存放核废料的储存材料所需要的抗渗透与辐射危害能力至少应维持上千年的时间。现在, Kurt Sickafus 和他的同事们在偶然中发现了一类陶瓷材料, 可以满足这一特殊的需求。