

宇宙的起源与未来——大爆炸宇宙论简介

苏中启 编译

(大庆职工大学基础部)

大爆炸宇宙论的产生，得益于天文学家们三个主要观测结果。第一个，也是最值得注意的一个观测结果是：1929年，埃德温·哈勃发现，宇宙的主要成分——与我们的银河系相类似的星系，象宇宙弹片一样在巨大爆炸后正彼此逃离开。如果宇宙正在膨胀，一个似乎是不可避免的结论是：它的过去必定是非常小的。这要求必须将某个瞬间作为宇宙诞生的时刻，即膨胀开始之时。哈勃的发现是真正重要的发现。尽管宇宙已非常古老了，但它不会无限早地存在着。可以想象，膨胀倒转回去，象电影倒过来放映一样，天文学家们据此推断，宇宙大约诞生于150亿年前发生的一次大爆炸。第二个观测结果是所谓“宇宙背景辐射”——大爆炸火球冷却以后余辉的存在，它支持了大爆炸理论。令人惊讶的是，在大爆炸事件发生150亿年之后，这种宇宙背景辐射仍充满空间的每个空隙。现在，冷却到的温度为2.726K（约为-270.3℃），它以短波辐射或微波形式出现。尽管宇宙背景辐射占穿过宇宙全部光能流的99%，它还是直到1965年才发现，并完全是一个偶然的事件。由于这一发现，两位青年天文学家，在美国电报电话公司贝尔实验室工作的阿尔诺·彭齐阿斯与罗伯特·威尔逊，获得了1978年诺贝尔物理奖。第三个观测结果也是大爆炸理论的支柱之一，即天文学家观测到宇宙质量的25%是由氢元素提供的。尽管大部分元素，例如碳和铁，众所周知是通过恒星内部的核反应由氢生成的。但宇宙存在得还不够长，还不足以使恒星产生出如此多的氢，这就是所谓宇宙“氢丰度”之谜。对这一异常现象的最好解释是：过去，整个宇宙曾经经历过一个热密度阶段，在这一阶段，核反应从氢中锻造出绝大部分氢。计算表明，在这个热大爆炸阶段，大约能将宇宙质量的25%转化成氢，正如所观测

到的那样。认识到大爆炸是热大爆炸的第一人是乔治·伽莫夫。大家熟知，自行车打气筒内的气体在被压缩时会变热，基于相同的理由，伽莫夫认为，人们有可能在相应的高温时应用已知的物理定律去理解宇宙早期的演化情况。在40年代，伽莫夫正是这样做的，应用核物理——处于数百万与数十亿度温度下物质的物理学的知识去理解宇宙在它最初几分钟内的情况是怎样的。于是热大爆炸理论诞生了。此后，又经过其他科学家的大量工作，就得到了我们今天所熟知的大爆炸宇宙论模型。

宇宙诞生于真空

150亿年前，我们的宇宙无中生有，以巨大爆发的形式产生出来，今天我们称之为大爆炸。所有的物质、能量、甚至空间与时间都在这一瞬间出现。美国物理学家艾伦·古思提出了一个纯属思辩的宇宙模型。他认为，宇宙大约于 3×10^{-43} 秒开始按指数规律急速地膨胀。这一所谓暴胀时代约于 3×10^{-35} 秒结束。此后，约从 3×10^{-34} 秒开始，宇宙继续膨胀，但膨胀速度则大大地减缓。这一缓慢的膨胀过程，就是我们前面所说到的大爆炸。初始暴胀过程是如此猛烈，以至于如果我们将其比作一次核爆炸的话，那么，其后发生的大爆炸则只不过相当于一颗手榴弹的爆炸而已。初始膨胀阶段，空间暴胀，直至它的体积扩大到比一个原子还小的初始体积的 10^{90} 倍时为止。我们目前全部可观察到的宇宙，包括所有的恒星与星系在内，均来自这一比原子还小的空间。令人不可思议的是，驱使这一猛烈膨胀的能量竟来自真空本身——空虚的空间。暴胀是一种异乎寻常的理论，除非你是一位粒子物理学家，否则要理解这一理论几乎是不可能的。暴胀是我们有关现代真空图象的副产品。众所周知，微观世界的某些物理量不能连续变化，而只能以某一最小单位的整

数倍发生变化,这最小单位称为该量的量子。例如,物质吸收或发射的辐射能量量子,其大小为 h ,即为普朗克常数。此外,有时也将同某种场联系在一起的基本粒子称为这一场的量子。比如,电磁场的量子就是光子,引力场的量子是引力子等。现代物理学认为,量子场是物质的基本存在形式,量子场的激发或退激即代表粒子的产生或消失。量子场系统的能量最低状态,亦即基态就是真空,处于真空中的各量子场仍处于不断运动之中,并且,量子场的各种振荡模式在基态中仍不停地振荡,叫做真空零点振荡。由此可见,真空不仅不是一无所有的虚空,反之,它却是沸腾着的具有“量子涨落”的空间。亚原子及它们的反粒子,按照海森堡测不准原理,被允许无中生有并在一瞬间互相湮没。测不准原理来自于对微小实体能量的测量行为是外加的,它以不可预见的方式改变了粒子的能量。所以,真空的能量在涨落,并且因为 $E=mc^2$,真空能可以产生出粒子。真空中量子场的相互作用使各种虚粒子不断地产生、消失与相互转化。由真空中的虚粒子可以导致出一些真实而又奇特的结果。虚粒子不仅能在真空中产生小的质量密度,而且这一密度还和负压——一类空间张力联系着,在正常情况下,这一压力是很小的,但是,当宇宙处于 3×10^{-43} 秒时,物质密度与真空密度都是 10^{94} 克/厘米³,其温度为 10^{32} K,它们导致了一种很特殊的“类真空状态”。在此类真空状态中,负压是势不可挡的。它显示为一种引力的排斥。在宇宙开始膨胀时,负压起了巨大的“推动”作用。但真空是不稳定的,如同处于激发态的原子必然要返回基态一样,大约经过 3×10^{-35} 秒以后,它衰变成我们今天所熟知的真空。由此得到的一些后果是令人惊讶的,当真空按指数规律膨胀时,其密度与压力仍保持为恒量,这是特殊真空态的另一稀奇古怪的性质。它意味着有巨大的能量可资利用。当真空衰变时,其能量用来产生近光速运动的普通粒子。此时宇宙的温度下降到 10^{27} K,热大爆炸即受遏制在宇宙暴胀之前,仅需要一颗微小的物质“种子”,由真空产生出平衡,这就导致如

下的一种看法,这个种子是一种量子涨落,正如古思所说的,它致使宇宙成为“最终的免费午餐”。暴胀解决的主要问题是所谓的视界问题。此问题如下:宇宙背景辐射的温度在天空的一些不同区域实际上是相同的,而这些不同的区域不可能在最后的散射时期有过接触,这些区域互相处在其它区域的视界之外。因此很难理解为什么这些不同区域有着相同的宇宙背景辐射温度。暴胀解决了此问题,因为我们整个宇宙从一个非常小的空间区域暴胀而来,而这个小的空间区域的不同点可以很容易地互相接触。

粒子与辐射相分离的演化史

伽莫夫已显示出物理学家们是如何窥视大爆炸的最初瞬间。今天的物理学家们,按照他的提示,应用有关物质在 10^{12} K或更炽热条件下的知识——这些知识是他们从巨大的粒子加速器中得到的——去探究粒子最初的形成过程。有鉴于伽莫夫探究大爆炸后数分钟这一阶段的情况,物理学家们颇有把握地预言了大爆炸后最初的千分之几秒和更早期宇宙的状况。由伽莫夫的遗训,我们现在认识到,宇宙来自何处的这类根本问题只能由高能粒子物理学作出回答。早期宇宙(指 10^{-34} 秒— 10^{-3} 秒之间的阶段)是一电磁辐射光子与物质微粒的“沸腾火锅汤”,随着温度的下降,粒子的混合物开始支配着宇宙的持续性变化,因为它们从光子中取得的可利用能量越来越少。其原因在于能量与物质,正如爱因斯坦所发现的,仅仅是同一枚硬币的正反两面,它们通过著名的质能关系方程 $E=mc^2$ 联系起来。这里 c 是光速,此方程意味着,当光子的能量至少等于 mc^2 时,粒子的特有质量 m 可以从光子中产生。随着温度的下降,光子活性减弱,由此使光子具有一临界温度,当低于这一温度时,质量为 m 的粒子就不可能产生。所以,当宇宙变冷时,粒子混合物会变成成为一道重粒子越来越少的“汤”。在宇宙生成的最初时刻处于支配地位的粒子与今天宇宙中存在着任何一种粒子都不相同。事实上,理论家们仅能推测它们像什么。没有可靠的指引,因

为物理学家们不可能在地球上达到类似的温度。但是大约于宇宙诞生的 10^{-3} 秒时,温度降低到10000亿度,此时,宇宙为非寻常的粒子所充满;这些粒子今天在粒子加速器中可以短暂地产生出来,它们中间有组成质子与中子的砌块——夸克。令人遗憾的是,还没有令人满意的理论能用于解释夸克汤的行为。所以,我们对宇宙诞生直至 10^{-3} 秒的这一阶段所知甚少。直至宇宙诞生大约 10^{-2} 秒时,它才被我们今天所熟知的粒子:光子、电子、正电子与中微子所充满。此时,三种夸克联合起来可以形成中子与质子,这是宇宙生成史上的第一个重要事件。然而,中子与质子只是宇宙的较次要的成份。到宇宙诞生1秒左右时,温度下降到100亿度;此时,光子不再有足够的能量从而容易地由能量产生粒子。宇宙生成历史上的第二个重要事件,即原子核的形成,于宇宙诞生100秒左右时发生。此时它的温度下降到只有10亿度,质子与中子此时运动得如此缓慢,以至于它们在彼此附近能停留得足够长,使核的胶合得以进行。核胶合是一种力,它能将质子与中子结合在一起,形成原子核,由此开始了核合成时代。在这一时代,轻原子核开始形成。这些轻原子核中包括氦——自然界中第二种轻的原子,由两个质子与两个中子组成——与其他轻元素,例如锂。然而,元素的构造过程是短命的。为了构造出更重的元素,例如碳与氧,需要更高的温度;但是,由于宇宙的膨胀,它急速地冷却下来了。因而,宇宙中重元素的产生要晚得多,产生在恒星深层内部的核反应炉中。形成氦后,任何剩下的中子都会变成质子,自由的中子衰变时间约为11分钟。根据物理学家的计算,每个氦核形成时,会剩下大约10个质子,这使得氦占宇宙质量的25%。在大爆炸半小时后,几乎所有的电子与正电子都互相湮没形成光子。但是,物理学定律中稍微的不对称确保在宇宙诞生初期所产生的电子要比正电子稍微多一些。这就意味着湮没结束时电子有微少的剩余。在宇宙中,每一个质子和中子,大约对应10亿个光子,这一比例一直持续到今天。宇宙早期历史上的第

三个重要事件是原子的形成。大约于大爆炸30万年后,当宇宙的温度下降到3000度左右,大约相当于太阳表面的温度时,它终于冷却到足够使原子产生。氢核与氦核迅速地扫荡了宇宙中所有的自由电子。这导致一个引人注目的结果,因为自由电子易于散射或改变光子运动方向,在这一“最后的散射时期”之前,光子一直弯弯曲曲地横穿宇宙,不断地与电子相碰。但是,在此之后,光子突然地自由飞行,无阻地穿过宇宙空间。今天,我们能看到的宇宙背景辐射正是这些光子,但由于过去150亿年内宇宙的膨胀,其温度已极大地冷却下来。这一“最后散射时期”的重要性是,它标志着物质与辐射在这一瞬间开始分道扬镳。直到这一时期之前,只要光子接近物质粒子,光子就会把物质粒子炸开。仅当物质最终从辐射的专制中获得自由后,它们才能在引力作用下开始凝聚成团,形成星系。令人惊讶的是,通过仔细地观测宇宙背景辐射这一宇宙最古老的化石,我们可以对星系形成过程的初始阶段一瞥。初看起来,天空各处均表现出相同的温度:2.726K。但是,1992年,美国国家航空与航天局的宇宙背景辐射探测卫星探测到背景辐射的一些“波动区域”。在其中的一些天空区域,其温度比天空的平均温度稍高一些,一些区域的温度稍低于平均温度,差别是很微小的,仅为十万分之几。根据卫星描绘出的热点与冷点,产生一幅宇宙“婴儿照片”,它恰好是宇宙诞生30万年时的留影。冷点对应的宇宙区域,其密度比平均密度稍高一些。冷点区域作为宇宙的“种子”,生长出今天宇宙的极大星系的集合体。

宇宙的未来

今后宇宙的进化方式将取决于它所包含物质的多少,因为所有星系引力的合力总是抑制正向膨胀。如果宇宙包含有足够多的质量,那么,迟早膨胀将缓慢下来,直至停止膨胀并开始收缩,然后所有创造出来的一切将不断地塌缩,形成一个“大收缩”,类似于大爆炸的镜像。然而,如果宇宙包含的质量不足以停止它的膨胀的话,那么,宇宙就会一直扩大下去,直至星系

的烧尽的残骸变成无限空间海洋中的孤岛。一些科学家甚至推测，我们事实上生活在一个振荡或来回变动的宇宙中。每次大收缩之后，接踵而来的是另一次大爆炸。象一个巨大的跳动着的的心脏，宇宙可能交替膨胀与收缩直至无穷。那么，宇宙究竟是会永远膨胀下去呢，还是最终会在一个大收缩中再次坍塌，遗憾的是无人知晓。宇宙膨胀与否，对质量、密度的需要，取决于哈勃常数的平方。由哈勃常数的还有争议的大小，可测得宇宙膨胀的速率。如果哈勃常数较大，则宇宙膨胀愈快，为停止膨胀所需的质量密度也就愈大。所以，当质量密度一定时，较大的哈勃常数就意味着要停止宇宙膨胀，这一质量密度就愈发显得不足。哈勃常数数值大约处于 $40-100 \text{ km s}^{-1} (\text{Mpc})^{-1}$ ($1 \text{ Mpc} = 326 \text{ 万光年}$) 之间。对处于这一范围的数值，美国阿拉巴马大学物理学家马克·亨里克森与法国巴黎-默东天文台天文学家加里·马蒙，根据对 NGC2300 星系团(包括星系团中所含的气体与暗物质)总质量的计算指出，宇宙的质量只相当于为停止膨胀所需质量的 10—50%。近年来，美国与澳大利亚科学家发现了宇宙中的某类暗物质，这些暗物质仅在受到可见星系的引力牵引后才会显现出来。没有一个人知道暗物质的组成，但是它们有可能占宇宙总质量的 90—99%。虽然亨里克森与马蒙在计算宇宙的质量时，将暗物质包括了进去，但如果暗物质更接近它的上限(99%)的话，那么，宇宙确实会在某一天再次塌缩。

结论

大爆炸宇宙论能较好地解释宇宙的膨胀，宇宙背景辐射与宇宙中氦的丰度问题，这是它的成功之处，由此也奠定了它在众多宇宙论模型中的所谓“标准模型”地位。但大爆炸宇宙论也有它的致命弱点，首先是对宇宙初始膨胀阶段(即从 $10^{-43}-10^{-35}$ 秒这一阶段)的解释问题。如果我们探究宇宙倒转到它自身产生的一刹那的情况，我们就会发现，宇宙已被压缩到一个不可能再小的体积内，此时它具有无限大的密度与无限高的温度。在数学术语中我们称宇宙起

源于一“奇点”。但是，奇点在任何物理理论中都是一个灾难，奇点告诉我们，在我们对自然界的描述中，我们已犯了一个极大的错误。从根本上讲，大爆炸宇宙论是在爱因斯坦广义相对论的基础之上产生的。彭罗塞与霍金等人证明，只要关于物质，能量，以及因果性等一些合理的物理条件成立，在广义相对论中就不可避免地存在着奇点。在这类奇点处，时空流形达到尽头。由于不知道奇性所遵循的规律，物理学，包括广义相对论，将随着奇点的出现而失效。其次，是宇宙“年龄冲突问题”。94年10月末，以英国格林威治天文台休伊斯博士为首的一个国际天文学家小组，在英国《自然》杂志上报道说，宇宙比它们包括的一些恒星还要年轻，与传统的大爆炸理论完全相悖。最近他们利用哈勃太空望远镜进行的测量表明，宇宙可能只有 80 亿年的历史。观测发现宇宙正在迅速地膨胀，其速度要比大爆炸理论认为的快得多。天文学家们还推断说，宇宙似乎比位于我们银河系的一些恒星还要年轻。银河系有可能已诞生长达 160 亿年了。“年龄冲突”表明，不是目前的标准大爆炸宇宙论需要修改，就是关于恒星和银河系的演变理论需要重新审查。此外，还有失踪质量问题、星系形成问题、正、反物质不对称问题以及各向同性的起源问题，都有待大爆炸宇宙论去解决。为避免奇点等问题，我们需要一个更好的理论，它就是“引力”量子理论。量子理论在描述其他三种自然力，即电磁力，弱与强核力时，一直是成功的，所以，人们对它寄予了厚望。对有关这三种力的量子理论可以在粒子加速器中进行检验，而对引力则是不可能的。理由很简单，引力太弱了。不过，无论如何，在粒子加速器中所进行的实验已提示我们，四种自然力仅仅是单一一种“超力”的不同方面的表现。在大爆炸后，随着宇宙温度下降，所有这四种力逐个地从这一超力中“冻结”出去。人们相信，当宇宙年龄仅为 10^{-43} 秒时，包括引力在内的所有的力，都是同一种力。因此，如果没有一个合适的量子引力理论，那么，对宇宙的诞生是不可能理解的。

(下转第34页)

电子“列车”标志着新物质态的存在

卞吉素 宝 编译

美国的三组物理学家最近发现了一种新的物质态,称之为“鲁特英格(Luttinger)液体”。在这种物质态中,电子互相连接着,就象火车的一节节车厢一样一起运动,而不是象以前那样单独行动。

30年前,纽约哥伦比亚大学的J.鲁特英格(Joaquin Luttinger)就提出了有关这种物质态的理论,但他仅仅把这作为解决物理问题的一种数学工具。目前已经退休的鲁特英格说“我怎么也不敢梦想它会真地被实验所发现”。

去年,费城宾夕法尼亚大学的查尔斯·凯恩和加州大学桑达-巴巴拉分校的马修·费希尔提出一个实验方案,力图证实鲁特英格液体的存在。实验目前已经进行,凯恩说,他有70—80%的把握肯定该态的存在。

在通常的温度下,导电材料中的电子总处在不停地疯狂运动中。但任一个电子的运动都不会对其他电子产生直接的影响。鲁特英格认为,如果电子被限制在一条很细的非常纯净的导线中,它们可能会有反常的行为。特别是,如果这条导线被冷却到接近绝对零度(-273°C)时,电子将会很紧地挤压在一起,以至于如果一个电子在移动,就会减小彼处的电子密度。为了恢复这一密度,其他的电子就会重新排列,其最后结果就成了鲁特英格液体,其间的电子就是互相连接在一起的。

由于鲁特英格液体中的电子只能一起运动,它就需要许多能量才能使自己运动起来。在温度接近绝对零度时,是达不到这种能量的。所

以这些电子难以在导线中流过。其结果是,导线的电阻将加大至无穷,而在一根普通导线中,由于只有少量几个电子一直在流动,所以电阻绝不会变得无穷大。

但是,要提供产生鲁特英格液体的条件是很困难的。电子一定要限制在一根细导线中,这才使得电子“列车”作纵向通过,而不是横向通过,使电子耦合更为明显。然而在这种细导线中,即使只有一个杂质原子,也会阻止正常导电。凯恩说:“杂质很难去掉,它可能毁掉鲁特英格液体”。

四年以前,麻省理工学院的温小刚(音译)认识到,如果对材料施加一个横穿磁场,就可以消除杂质的这种破坏性作用。

理查德·韦布等人在IBM的一个实验室中对温小刚的理论进行了实验检验。他们用两种半导体——砷化镓和砷化铝镓制造了一个装置,然后改变电压和温度(低达 0.038K),测量装置的特性,得到了符合鲁特英格液体的实验数据。

在实验开始以前,装置必须冷却三周,以便稳定杂质。

韦布说,他对实验结果感到兴奋,“这是一个例证,说明电子的图像不再适用了”。他认为电子的集体行为可以为更复杂的电子结团行为提供线索,甚至可能借此弄清高温超导电性的问题。

(编译自英《新科学家》1994年第1923期第17页)

(上接第27页)

在任何量子理论中,由于海森堡测不准原理,在空间中有一个精确位置的概念被抛弃了。其含义是说,即使宇宙逆时倒回,它也决不可能达到这样的阶段,这时所有的产生物都被压缩到单

一个点中去。总有些什么东西去阻止奇点的形成,假若没有引力,量子理论就不可能说清是什么东西。

(编译自英《新科学家》93(1994)1914)