

谈宇宙学

ABOUT COSMOLOGY

陆 埏

二十年来,在物理学两大前沿领域内,形成了两个标准理论。一个是在小的前沿,在粒子物理领域内形成的统一弱作用与电磁作用的理论。这个理论十分成功,为此,已经颁发了两次诺贝尔奖金(1979, 1984)。另一个是在大的前沿,在天体物理领域内形成的标准宇宙学。这个理论也十分成功,为此,也已经颁发了一次诺贝尔奖金(1978)。所谓标准理论,就是已经历了深入的观测检验,从众多的理论模型中选出来的,得到了广泛承认的理论。

由于国内对宇宙学还不十分了解,甚至还存在一些误解和偏见。本文打算就普遍存在的几个问题,对宇宙学作些介绍。

什么是标准宇宙学?

标准宇宙学,俗称大爆炸宇宙学,是建立在近代物理和宇宙学原理基础上的一门关于宇宙的起源,结构和演化的科学。所谓宇宙学原理,指的是在宇宙尺度上,宇宙可以看作是均匀的,各向同性的,不存在中心。但是,宇宙的均匀状态可以随时间而变化,宇宙是一个演化的宇宙。

按照标准宇宙学,宇宙在不断地膨胀,随着膨胀,物质密度在减小,温度在下降,这是一幅绝热膨胀降温的物理图象。不同的温度,表示粒子具有不同的热运动能量。从高温到低温,粒子物理,原子核物理,等离子体物理,原子物理等等,将相继扮演重要角色。

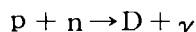
宇宙刚诞生的时候,密度极高,近于无穷大。初时并不存在粒子,但引力极强。大约在 10^{-44} 秒(普朗克时代)时,引力能转化为粒子能,粒子和反粒子产生出来。这时温度高达 10^{32} K(即绝对温度 10^{32} 度),粒子的热运动能量达 10^9 GeV,比现在最大的加速器能

量还高16个数量级。

宇宙诞生后 10^{-36} 秒(大统一时代)时,温度降到 10^{28} K,粒子的热运动能量达 10^{15} GeV。在这样的能量下,按照粒子物理中的大统一理论,重子数不守恒的过程会有效地进行,从而造成重子(中子、质子均称重子)略多于反重子(重子不对称性)的结果。比如,如果重子比反重子多十亿分之一左右,那么当宇宙演化到较低温度,反重子与重子相湮灭后,就可以留下一个几乎不存在反重子的,我们现在实际见到的世界。

在宇宙的头1微秒(10^{-6} 秒),温度为 10^{13} K,粒子能量为1 GeV。这样的能量还相当高,属于高能物理范围,宇宙内进行着大量的粒子物理过程(强子时代),这时,质子、中子和反质子、反中子还大量存在。宇宙年龄为 10^{-2} 秒时,温度降到 10^{11} K,粒子能量降到10 MeV。这时大量强子已经湮灭,只是因为大统一时代造成的重子略多于反重子的结果,质子和中子尚可留存少量。但这时轻子(电子、中微子)和反轻子仍大量存在,轻子之间的电磁作用过程和弱作用过程支配着这一时期(轻子时代)。宇宙年龄为1秒时,温度为 10^{10} K,粒子能量减少到1 MeV,中微子的碰撞越来越少,已跟不上宇宙膨胀的温度变化,开始脱离热平衡,成为一种无碰撞气体。既然不再碰撞,中微子($\bar{\nu}$)与反中微子($\bar{\bar{\nu}}$)也就不再湮灭。这使得中微子和反中微子可以一直大量存在于宇宙中。

宇宙年龄为3分钟时,温度降到 10^9 K,粒子能量减小到0.1 MeV。这样的能量已不足以引起粒子物理过程,甚至对于通常的核物理过程也显得偏低。但是,宇宙中原来并无原子核。原子核形成第一步应是氘核(D)的形成:



由于质子(p)、中子(n)比光子(γ)少得多,前者大约仅为后者的 10^{-9} ,即使平均热运动能量较低,也还会有相当数量的光子具有较高的能量,足以引起反过程,使氦核分解为质子和中子。只有温度降到 10^9 K后,氦核才有效地生成。一旦氦核生成,就会进而生成 He^4 , He^3 , Li^7 , Li^6 等。这就是核合成时代。 He^4 的合成特别引人注目。用标准宇宙学可以明确算出,按重量计,生成的 He^4 约占各种原子核(包括质子)总和的 $1/4$ 。实际上,其余 $3/4$ 就是质子,即氢核 H^1 。除 H^1 和 He^4 以外的其他原子核所占的量是微乎其微的。

从 10^{10} K到 10^9 K的过程中,电子(e^-)和正电子(e^+)大量地湮灭。到了核合成时代,已只有少量电子,它与同样少量的质子、 He^4 核形成总体为电中性的等离子体。光子大量存在,并通过电磁作用与等离子体相耦合。当然,中微子虽不参与热耦合,但同样大量存在着。以后相当长的时期内,宇宙一直保持着这种状态,只是密度在减小,温度在下降。

宇宙年龄为 4×10^5 年时,等离子体将转变为中性气体,即质子俘获一个电子复合成中性氢原子, He^4 核俘获二个电子复合成中性氦原子。等离子体由正、负电粒子组成,因而与光子之间有强的电磁耦合,光子与正、负电粒子频繁地进行着碰撞。变成中性气体后,中性原子不带电,光子不再与它们碰撞,从而脱离了耦合。就是说,复合前,光子与等离子体处于热平衡状态,它们有共同的温度。因此,复合时,光子应为 4×10^3 K的黑体辐射。复合后,对于光子来说,宇宙变成了透明的。以后这种黑体辐射光子除了其波长随着宇宙膨胀而变长(波长变长称为红移)以外,没有别的变化。今天来观测它,看到的应当仍是黑体辐射,只是波长大大变长,红移到了相当于3 K低温。

在复合时代以后的岁月中,通过局部引力收缩,逐步形成星系团、星系、恒星等天体。大阳系和人类也就是在这个时期形成、进化和发展的。今天的宇宙年龄已经是 $(1 \sim 2) \times 10^{10}$ 年了。

这些就是标准宇宙学所描述的宇宙的简况(见表1)。

建立标准宇宙学有什么依据?

依据包括两个方面。一是观测依据,一是理论的依据,上面我们已经在宇宙学原理和近代物理的基础上,阐述了标准宇宙学的基本内容。我们是从一个高温高密度而且均匀的初始宇宙出发进行分析的,每一步均用近代物理加以讨论,事实上还可以较精确地加以计算。这里,并没有用什么特别的假设。因此,要说明的只在于宇宙学原理的依据。

人类总希望自己就在宇宙的中心。亚里士多德和托勒密就曾把地球看作宇宙的中心。后来,哥白尼否定了地球中心说,把太阳放到宇宙的中心。随着天文学的发展,人们认识到,与其他许许多多恒星一样,太阳不过是一颗普普通通的恒星。实际上,银河之外,还有千千万万个银河(称星系)。我们的银河也不过是一个普普通通的星系。地球(因而人类)逐渐从宇宙中心宝座上跌下来,成为宇宙普普通通的一员。这是认识上的一大进步。正是人类这种终于获得的自知之明,为现代宇宙学的蓬勃发展,创造了前题。

尽管在近距离上看来,宇宙中的物质分布总是成团的,如恒星、星系、星系团。但是,人们发现,尺度越大,分布越均匀。星系团的分布,特别是超星系团的分布,已看不出任何不均匀性了。可见,从大尺度来看,物质分布是均匀的。如果将所有星系物质散布在整个宇宙空间中,平均密度约为:

$$\rho_B = 3 \times 10^{-31} \text{克/厘米}^3$$

人们对宇宙物质质量的测量,通常有两大类。一类是光度法,通过光度测量来推算质量;一类是动力学法,通过动力学观测,根据引力大小来估算质量。人们发现,动力学质量往往大于光度质量;观测对象越大,这种差别越显著。显然,宇宙内除了看得见的物质以外,还有大量看不见的暗物质。比如,后发座星系团内暗物质质量约为可见物质的20倍;英仙座星

表1 宇宙时代及特征

宇宙年龄	温度	能量	时代	物理过程
10^{-44} 秒	10^{32} K	10^{19} GeV	普朗克时代	粒子产生
10^{-36} 秒	10^{28} K	10^{15} GeV	大统一时代	重子不对称性产生
10^{-6} 秒	10^{13} K	1 GeV	强子时代	
10^{-2} 秒	10^{11} K	10 MeV	轻子时代	
1 秒	10^{10} K	1 MeV		$\nu, \bar{\nu}$ 脱离热耦合
3 分	10^9 K	0.1 MeV	核合成时代	He^4 等轻核合成
4×10^5 年	4×10^3 K	0.4 eV	复合时代	(p, e^-)复合成中性氢, (He, e^-, e^-)复合成中性氦
$(1 \sim 2) \times 10^{10}$ 年	2.8 K	3×10^{-4} eV	现在	从复合时代到现在,经历着丰富的成团和局部再加热过程,形成星系,形成恒星,形成太阳系,形成人类。

系团内甚至达100倍。暗物质在宇宙内的分布比可见物质更均匀些。

1929年,哈勃发现,越远的星系,其光谱线红移越大,符合近似正比关系:

$$Z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} \approx \frac{H_0}{c} R$$

Z 为谱线红移量, R 为星系距离, H_0 为哈勃常数,其观测值为 $H_0 = (0.5 \sim 1) \times 10^{-10}$ /年。哈勃关系式表明,宇宙在膨胀,各星系在不断远离我们,越远的星系,远离速度越大。光谱线的红移正是星系离去速度(v)的多普勒效应所致: $Z = v/c$ 。

因此 $H_0 = v/R$ 。

这些观测结果表明,在宇宙尺度上,目前的宇宙是均匀的,并且正在膨胀中。由于长程力只有引力和电磁力两种,而宇宙是电中性的,在大尺度上只有引力起作用。因此,宇宙的膨胀是减速的。过去的膨胀比今日更快。如果我们来考察宇宙的去,宇宙将一直收缩,而且越来越快,没有一种力可以阻止这种收缩。可见,宇宙早期必然处于均匀的高温高密度状态。

这就是标准宇宙学的依据。

宇宙有限还是无限?

这是一个长期争论的老问题。这个问题至今还没有明确答案。

宇宙正在膨胀,但是膨胀正在减速。这有两种可能:如果膨胀速率有朝一日会减速为零,此后宇宙便转为收缩,这是有限宇宙;如果膨胀率永远不会减速到零,宇宙永远膨胀下去,这是无限宇宙。关键在于减速的大小,也就是引力的强弱,即宇宙物质密度的大小。如果宇宙物质密度大,引力就强,减速就大,宇宙就会是有限的。反之,宇宙是无限的。因此,存在一个临界密度:

$$\rho_c \approx (5 \sim 20) \times 10^{-30} \text{ 克/厘米}^3$$

宇宙密度大于此值,为有限;小于此值,则无限。如果仅有可见物质, $\rho_v = 3 \times 10^{-31}$ 克/厘米³,比临界值小几十倍,宇宙应是无限的。然而,宇宙中存在着暗物质,而且暗物质质量比可见物质也许会大几十倍。因此,暗物质的研究将关系到宇宙究竟有限还是无限这样的基本问题。

无限宇宙对应于宇宙永远膨胀下去的情形。但不要误解为宇宙每时每刻均有限,只是无限膨胀下去才最终趋于无限。应当说,对于无限宇宙,每时每刻其空间体积总是无限的。

至于时间,其将来可能有限,也可能无限,目前尚不能确定。但是,其过去却总是有限的。宇宙总有个诞生,时间总有个起点。我们可以确切地估计出宇宙诞生的时刻,或者说,估计出今天宇宙的年龄。从哈勃关系可知,如果宇宙等速膨胀(不减速),那么宇宙年龄就是: $1/H_0 \approx (1 \sim 2) \times 10^{10}$ 年,也就是从

今天的宇宙收缩到刚诞生时刻所要的时间。实际上存在着减速,过去宇宙应膨胀得快些,因此宇宙的实际年龄应小于 $1/H_0$ 。另一方面,宇宙年龄又必须大于宇宙中任何天体的年龄。已经观测到的最老的天体是球状星团,最老的年龄约为 $(1 \sim 1.3) \times 10^{10}$ 年。所以,宇宙年龄 τ 应为:

$$1 \times 10^{10} \text{ 年} < \tau < 2 \times 10^{10} \text{ 年}。$$

用实验室内建立的物理理论去研究宇宙大尺度问题,在方法论上合理吗?

这个问题正是过去一些人排斥宇宙学所依据的理由。其实,科学研究总是用已知的科学理论去研究未知的领域。只有在这种应用遇到了基本性困难时,才要考虑修改已知的科学理论。这也正是科学理论本身发展的正确方法。在宇宙学的研究中遵循的也是这个同样的方法。不允许用已知科学理论去研究未知领域,等于取消科学的发展。

宇宙学研究了宇宙自古至今的演化。如何对发生于过去的过程进行检验?

宇宙学在某种意义上也象考古学。古代发生过的一些事,今人自然无法亲身经历。但是古代发生的事总会留下一些遗迹,今人可以通过这些遗迹,经过考证推理,对古代的事作出推断,这就是考古学。对于宇宙学的检验,遵循的也是类似的原则。

按照标准宇宙学,复合时代脱耦留下的4000 K黑体辐射光子,就是一种重要的宇宙学遗迹。不过,宇宙的膨胀已使波长大大变长,使光波变成了微波,成为大约3 K的黑体辐射。1965年彭齐斯与威尔逊发现的3 K微波背景辐射,正是4000 K复合时代留下的遗迹,这一发现有力地支持了标准宇宙学。研究这个遗迹可以了解复合时代的情况。比如,观测发现,3 K微波背景辐射是高度各向同性的,这表明复合时代的物质分布是高度均匀的,因而也证实了宇宙学原理的正确性。

核合成时代($\sim 10^9$ K)留下的遗迹是D、He⁴、He³、Li⁷等轻原子核。应当指出,原子核不仅可以在宇宙演化过程中生成,而且也可以在其后的恒星过程中生成。D、He³、Li⁷等丰度极低,且还会受到恒星过程的明显影响,用以直接检验宇宙学尚有赖于对恒星过程影响的细微研究。

然而恒星过程生成的He⁴只有百分之一左右,决不可能达到1/4这样高的丰度。人们在恒星光谱中,在星际介质中,在宇宙线中,均发现He⁴的密

度约为 $1/4$ 。因此, He^4 的丰度观测是对标准宇宙学的又一有力支持。细致研究轻核丰度以及恒星过程的影响, 可以了解宇宙在核合成时代的情况。

大量的中微子是宇宙头 1 秒钟留下的遗迹。这些背景中微子包含了宇宙早期的丰富信息。但是, 中微子只有弱作用, 极难探测, 因而在目前还不象微波背景辐射那样清楚, 人们正在对它进行详细研究。

我们生活的这个世界, 是由质子、中子等组成的。天文观测也证明, 宇宙间反质子、反中子几乎不存在。这个事实, 正是大统一时代造成的重子不对称性的遗迹。粒子物理的大统一理论尚属探测性研究阶段。对于重子不对称性的研究可以了解宇宙极早期 (10^{-36} 秒) 的情况, 也有助于检查大统一理论本身。

宇宙早期在那么短的时间内 竟能做那么多的事情, 令人 费解!

的确, 世界上的 He^4 基本上是在宇宙诞生后的头 3 分钟形成的; 我们的物质世界的基础甚至是在宇宙的头 10^{-36} 秒奠定的。这些粗看起来似乎“荒唐”, 细细想想并不奇怪。碳和氧在常温下几乎不会生成二氧化碳, 然而在高温下就会很快(甚至猛烈地)生成二氧化碳。显然, 物理过程决定于分子、原子、粒子之间的相互碰撞。温度越高, 密度越大, 碰撞的机会也就越多, 物理过程自然越容易发生。在宇宙早期那样的极高温、极高密度的情况下, 物理过程必然迅猛异常, 一点也不奇怪。

事实上, He^4 必须在宇宙的头几分钟内形成, 这是非常明显的。注意, 中子是不稳定粒子, 它会进行 β 蜕变而变成质子, 寿命只有约一刻钟。如果 He^4 是在宇宙诞生后几小时或更长的时间后才形成, 那么那时几乎所有中子均已蜕变为质子, 宇宙内已不存在中子, 无法再形成 He^4 了。正是 He^4 , 以及由它进一步形成的更重元素, 为我们今天的物质世界保存了大量可贵的中子。

今天的宇宙学研究些什么?

前面已经谈到, 标准宇宙学获得了十分巨大的成

功, 使人们相信, 标准宇宙学的总框架应该是正确的。还应当指出, 关于宇宙极早期以及晚期星系形成等方面还存在着一些重要问题, 这些正是目前人们集中研究的问题。

宇宙刚诞生时发出的信号所能传播的最大距离(即按光速传播的距离), 通常称为视界。视界也表示可能有因果联系的最大范围, 因为距离超过视界的两处, 它们之间不可能有任何相互影响。但是, 按照标准宇宙学, 宇宙的膨胀速率比视界的增长速率慢。我们今天观察到的均匀范围, 在宇宙早期会远大于视界。由此引起一个问题: 为什么远大于视界的范围会显出均匀性? 什么因素使没有因果联系的地方保持均匀? 近年来, 粒子物理关于真空的研究, 提供了宇宙早期可能曾快速膨胀的机制。从而发展形成了名叫暴胀宇宙模型的理论。这是解决上述困难的一种可能方案。

宇宙原来是相当均匀的。至少, 微波背景辐射的观测表明, 复合时代的宇宙是高度均匀的。这个均匀宇宙在继续膨胀过程中如何演化生成星系团、星系这种不均匀性来, 是宇宙学中另一尚待解决的重大问题。事实上, 这种宇宙大尺度结构已经成为宇宙学中当今十分丰富的研究内容。类星体一般是比星系更远的天体, 对于类星体的研究, 已经为宇宙学提供了大量可贵信息。近年来发现, 往往看去, 类星体分布时起时伏, 似乎存在着周期性。方励之和佐藤等猜测, 类星体分布的这种周期性可能是宇宙多连通结构的反映。这是宇宙学的一种拓扑结构。普朗克时代以后, 宇宙的演化是保持拓扑守恒的。因此, 类星体分布显示的晚期宇宙的拓扑结构应是普朗克时代宇宙的拓扑结构的遗迹。这是人们所知最早的一种可能的宇宙遗迹。

人们正在发展一种新的观测设备——空间望远镜。1988年可望将这台望远镜送入地球外层空间轨道。由于避免了大气层的干扰, 它将大大提高观测灵敏度和分辨率。已经计划, 空间望远镜将拨出大量观测时间, 用于研究宇宙学。人们希望, 不久的将来, 宇宙学将会发展成为更加系统, 更加丰富的一门科学。

中国分析测试协会正式成立

在国家科委、中国科协的关怀和支持下, 中国分析测试协会于今年十二月十二日在北京成立。国家科委、中国科协 and 有关部委的领导同志出席了成立大会。第一批团体会员有 68 个, 代表 120 人。

会议听取了协会筹备工作报告, 通过了协会章程, 选举了理事会成员, 制定了明年协会工作计划, 正式确定会刊为《分析测试通报》。

中国分析测试协会名誉理事长为严济慈, 理事长为国家科委特邀顾问杨浚。

(文孙谋)